

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DOS MATERIAIS

EQUIPAMENTO DE ENSAIO  
PARA  
ACELERÔMETROS PIEZOELETRICOS

por

EDSON SCHÜLER

Dissertação submetida como requisito parcial para  
a obtenção do grau de Mestre em  
Ciência dos Materiais  
Sub-área Instrumentação

Prof. Dr. Ildon Guilherme Borchardt  
Orientador

Porto Alegre, janeiro de 1997

ESCOLA DE ENGENHARIA  
BIBLIOTECA

Schüler, Edson

Equipamento de Ensaio para Acelerômetros  
Piezoelétricos. Porto Alegre, PPGEMM-  
DEMET-UFRGS, 1997.

150 f.

Dissertação: Ensaaios, Acelerômetros  
Calibração, Transdutores,  
Instrumentação digital

## AGRADECIMENTOS

Aos seguintes amigos e profissionais,

Fernando Bauer,  
Silvano Baptista de Souza,  
Santiago Luis Bargas,

que emprestaram além da sua competência, sua boa vontade e seu tempo, sem o que este trabalho não teria sido possível.

## SUMÁRIO

RESUMO	-----	iv
ABSTRACT	-----	v
1.	INTRODUÇÃO -----	6
2.	TEORIA DE OPERAÇÃO DOS ACELERÔMETROS -----	12
	2.1 Vibração de um ponto material -----	12
	2.2 Materiais Piezoelétricos -----	17
	2.3 Transdutores piezoelétricos de aceleração --	18
3.	ENSAIOS E CALIBRAÇÃO -----	21
	3.1 Principais características e interferências -	21
	3.2 Equipamento viável -----	25
	3.3 Ensaios implementados -----	28
4.	EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO -----	30
	4.1 Mesa vibratória - dimensionamento -----	31
	4.2 Técnica de excitação da mesa -----	34
	4.3 Condicionamento dos sinais medidos -----	40
	4.4 Painel de controle e operação do ensaio ----	42
	4.5 Programa de controle -----	47
	4.6 Precisão da Referência -----	51
	4.7 Características técnicas -----	53
5.	DISCUSSÃO DA MONTAGEM E RESULTADOS -----	55
	5.1 Operacionalização -----	55
	5.2 Programa de controle -----	56
	5.3 Comparação direta com gravidade local -----	58
	5.4 Medições do funcionamento da Mesa Vibratória	59
6.	CONCLUSÕES -----	61
7.	BIBLIOGRAFIA -----	63
APÊNDICES		
A1	Sine Wave Synthesis Using Microcontroller PWM Support -----	66
A2	Registrando o Ensaio de Transdutores -----	88
ANEXOS		
a1	Desenhos mecânicos -----	109
a2	Esquemas eletrônicos -----	113
a3	Diagrama de conectores -----	120
a4	Listagem do programa de controle -----	124



## RESUMO

Este trabalho descreve o projeto de um equipamento de pequeno porte para ensaio de acelerômetros, substituindo um conjunto de equipamentos de alto custo e integrando funções como uma mesa vibratória eletromagnética vertical, um amplificador DC de potência, um gerador de frequências sinusoidais de precisão, um *encoder* de posição de referência, um multi-condicionador programável para acelerômetros e uma unidade microcontroladora de procedimentos de ensaio, com saída gráfica para impressoras seriais convencionais e para portas RS-232C de microcomputadores.

A calibração de acelerômetros é baseada em grandezas fundamentais medidas pelo equipamento, ao invés da utilização de acelerômetro de referência.

O sistema eletromecânico de excitação é também descrito neste trabalho; a unidade microcontrolada pode gerar varreduras em frequência e amplitude de forma a excitar o acelerômetro em teste ao longo da faixa de interesse. Os dados adquiridos do ambiente de teste são processados para gerar curvas de calibração e determinar índices de desempenho.

### ABSTRACT

This work introduces a small sized equipment for the calibration of accelerometers, in substitution for a set of high-cost instruments, and integrating functions like an electromagnetic vertical shaker, a power DC amplifier, a precision frequency sine-wave generator, a reference position encoder, a programmable multi-type accelerometer conditioner and a testing procedure micro-controller unit, with outputs to graphic standard serial printers and to RS-232C microcomputer ports.

The callibration of the accelerometer is based on fundamental quantities measured by the equipment instead of using a reference accelerometer.

The electromechanical exciting system is also described in this work; the microcontrolled driver can generate sweeps in frequency and amplitude in order to excite the testing accelerometer along the interest range. Data collected from the testing environment are processed to generate calibration curves and determine performance characteristics.

## 1. INTRODUÇÃO

Os acelerômetros são transdutores utilizados em larga escala na indústria de processo (química e petroquímica), na geração de energia elétrica, e nos laboratórios de desenvolvimento de produtos. O que segue é uma breve perspectiva da área de utilização destes componentes e aspectos associados ao seu uso.

### 1.1 Manutenção Industrial

No campo de uso cotidiano industrial, a principal aplicação dos acelerômetros é na assim chamada Manutenção Preditiva. A Manutenção Preditiva tem-se firmado nas últimas décadas como ferramenta ímpar na redução de custos operacionais das indústrias de processo e geração de energia elétrica.

Por Manutenção Preditiva entende-se o acompanhamento do estado de funcionamento de máquinas em serviço, efetuado com instrumental de medição, para predizer falhas, ou detetar mudanças em suas condições físicas que requeiram tarefas de manutenção [YAC/83]. Esta técnica é o terceiro estágio do desenvolvimento da manutenção industrial, que têm importância dramática na indústria de processo, onde a quebra de um equipamento em operação normalmente provoca a parada de todo um setor de produção, quando não acarreta danos adicionais a outros equipamentos ou até riscos de explosão ou ameaça à segurança dos operários.

O primeiro estágio foi a manutenção curativa, visando consertar o equipamento quebrado, e que continua a ser a última instância de ação, de qualquer forma. Com o desenvolvimento da linha-de-montagem, implementou-se o segundo estágio, da manutenção preventiva, que visou sincronizar os atendimentos de equipamentos em

paradas programadas, intervindo adiantadamente nos equipamentos cujo tempo de serviço atingisse uma estatística de vida sem falhas e substituindo componentes desgastados, para minimizar a chance de quebra em operação. Esta técnica é dispendiosa e provoca a desmontagem de equipamentos que estavam em condições de trabalho, e até a sua danificação eventual neste processo. No terceiro estágio, durante a parada para manutenção geral, apenas os equipamentos marcados como irregulares são desmontados, já com as tarefas de manutenção previstas (em carga horária, ferramental e componentes a substituir).

Entre a população majoritária das máquinas rotativas, a Vibração apresenta-se como uma das mais importantes variáveis, devido ao seu envolvimento direto com as causas básicas de mal-funcionamentos, como deformações, folgas ou falhas de lubrificação, sendo de controle obrigatório em qualquer plano de manutenção preditiva. Além disso, a riqueza de informações de um espectro vibratório medido permite analisar com detalhes os prováveis defeitos por desgaste de uma máquina enquanto esta continua em pleno funcionamento.

## 1.2 Medição de Vibrações

O mais importante transdutor para vibração e choques é o Acelerômetro [DOE/83]. A base dessa popularidade repousa nas seguintes características:

- a) *A resposta em frequência vai desde quase zero até um valor de limite superior, normalmente alto.*
- b) *deslocamento e velocidade podem ser facilmente obtidos por integração elétrica, que é muito mais estável que a diferenciação.*
- c) *a medição de movimentos transitórios (choques) é mais facilmente obtida do que com o emprego de sensores de deslocamento ou velocidade.*
- d) *as forças destrutivas em maquinaria frequentemente estão mais diretamente relacionadas com aceleração do que com velocidade ou deslocamento.*

Desta forma hoje temos a figura do inspetor de manutenção, que percorre periodicamente os equipamentos, e usa um coletor de vibrações como um médico usa seu estetoscópio, aplicando o sensor em



pontos marcados dos mancais e anotando o nível de vibração presente. Cada equipamento tem sua ficha, onde são anotados os níveis de vibração das inspeções periódicas, e o nível de vibração máxima especificado pela engenharia como seguro para aquele equipamento. Quando um equipamento apresenta um nível de vibração superior ao seu limite de segurança, ou a vibração medida mostra um crescimento muito rápido em relação à medição anterior, este equipamento é marcado para análise.

TABELA I

*Identificação das Vibrações de Equipamento  
girando a frequência  $f_0$*

CAUSA	$f/f_0$	Vib	Amplitude	Observações
-Desequilíbrio	1	d	proporcional ao desequilíbrio. Maior na direção radial	geralmente aparece como 1 <sup>a</sup> harmônica
-Desalinhamento ou curvatura do eixo	1,2, 3,4	d	grande na direção axial (maior que 50% da amplitude radial)	desalinhamento de coxins do acoplamento
-Flanges excêntricos	$\frac{1}{2}$	d	geralmente pequeno	
-Folga excessiva nos mancais	$\frac{1}{2}, \frac{1}{3}$	d	grande no sentido vertical	a fase pode ser rotativa
-Falta de firmeza mecânica	2	d	dupla, ligeiramente instável	geralmente ligada ao alinhamento
-Correias frouxas	1	d	instável	
-Correia defeituosa	Freq. da corr.	d	depende da relação entre $f_{eixo}$ e $f_{corr.}$	observável com luz estroboscópica
-Elétrica	$1, \frac{1}{2}$ $f_{sinc}$	d	desaparece bruscamente ao se desligar o motor	
-Engrenagens defeituosas	nº de dentes	a/d	pode conter blips	freq. alta (15.000-40.000 RPM) se defeito de superfície
-Rolamentos deteriorados	muito alta	a	pode conter blips	15000-40000 RPM
-Lubrificação	muito alta	a		

Os equipamentos marcados para análise são vistoriados por um engenheiro supervisor de manutenção, que utiliza um analisador de vibrações. Este equipamento permite determinar as várias frequências componentes da vibração total medida, e pela comparação com a rotação básica do equipamento, determinar as suas origens e os procedimentos de manutenção a serem realizados na parada do mesmo.

A Tabela I exemplifica como as componentes vibratórias podem ser associadas a possíveis causas, lembrando que o nível de vibração *Vib* pode ser medido em deslocamento, velocidade ou aceleração.

Além da manutenção preditiva, equipamentos caros e sem fácil reposição, como rotores de turbinas em usinas elétricas, podem ter seus níveis de vibração permanentemente fiscalizados por monitores de vibração, que são ajustados para emitir alarme em um nível e desligar automaticamente os equipamentos em um segundo nível.

### 1.3 Outros Usos de Acelerômetros

Ao lado da área mais tradicional da manutenção industrial, acelerômetros são utilizados em aeronáutica embarcada, nos sistemas de navegação das aeronaves, e na testagem de componentes aviônicos que serão submetidos a vibrações permanentes, principalmente em jatos militares. Outra área de emprego é a da engenharia ergonômica e ambiental, no projeto de veículo e instalações, visando a proteção e o conforto das pessoas que os utilizam. A propagação de vibrações induzidas também permite a testagem estrutural de carrocerias e estruturas de concreto [SER/86]. Acelerômetros também estão sendo utilizados para acionar sacos pneumáticos de segurança em acidentes automobilísticos, ou detonar as cabeças de mísseis militares, e em sensores de prevenção de sismos [ALL/89].

### 1.4 Calibração dos Transdutores

Tanto fabricantes como usuários de acelerômetros necessitam calibrar os transdutores periodicamente [ANS/69], o que não é elementar. A obtenção da curva de calibração de um acelerômetro exige a montagem

de um conjunto sofisticado de instrumentos, como exemplificado com equipamentos da Brüel & Kjær [SER/86]:

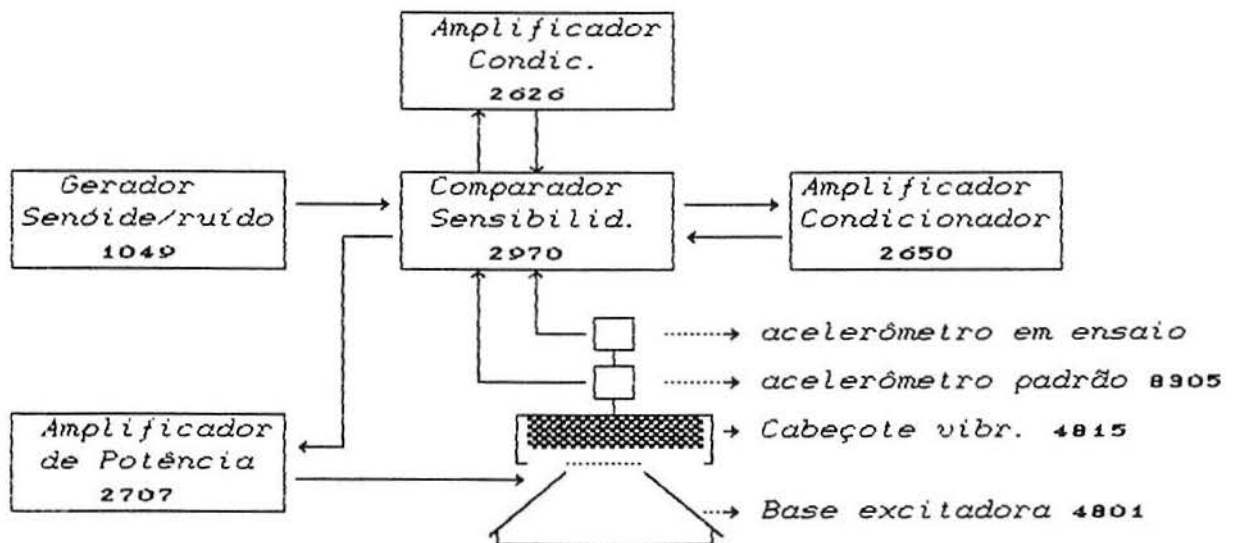


Fig 1.1 - Montagem para teste de acelerômetros

Soluções de campo simplificadas têm sido utilizadas, como montar o acelerômetro em ajuste solidário contra um acelerômetro de referência e excitar o conjunto com uma fonte vibratória disponível (normalmente uma intensidade, uma frequência) comparando os sinais de saída [TUS/87], o que não é satisfatório tanto pela restrição em frequência como em intensidade, além da limitação de precisão da referência.

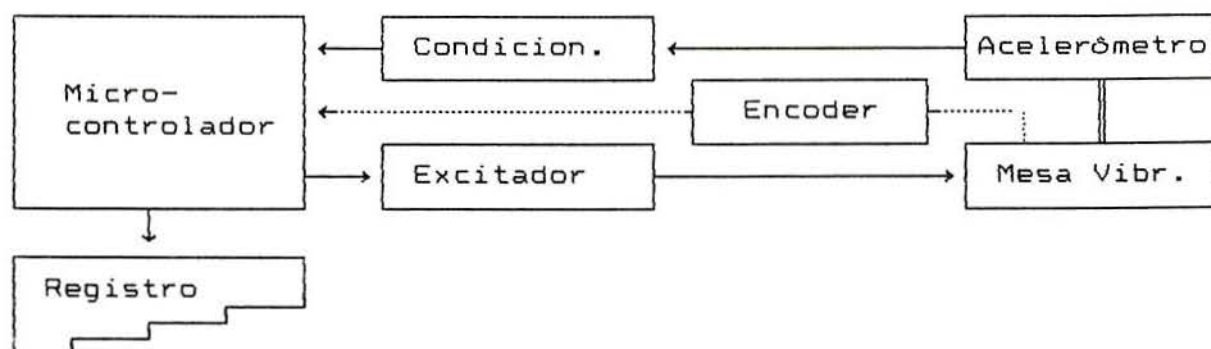
Além destes requisitos, um ciclo de calibração deve passar de uma amplitude para a próxima de uma forma monotônica, de outra forma efeitos como histerese não podem ser corretamente avaliados. Não é apropriada, portanto, uma técnica em que se tenha de desligar o vibrador para ajustar o próximo nível de ensaio, por exemplo.

### 1.5 O Calibrador de Transdutores de Vibração proposto

O conjunto de ensaio aqui desenvolvido consta de uma Mesa Vibratória capaz de excitar o transdutor em várias amplitudes e frequências, um sistema de medição da vibração da mesa através das grandezas fundamentais de espaço (*encoder*) e tempo (*cristal oscilador*), e das



saídas do acelerômetro em ensaio ou de referência (retificação RMS, conversão A/D), e de um sistema microcontrolado de análise dos dados de ensaio (filtragem, cálculo de sensibilidade, linearidade, histerese e repetibilidade) e plotagem dos resultados (curvas de calibração, pontos críticos, tabela de valores adquiridos).



*Fig 1.2 - Diagrama de Blocos do Calibrador*

Procura-se aqui fornecer uma folha de calibração de forma automática com os dados essenciais do transdutor, e curvas com marcação de escala X e Y adequadas à sua leitura posterior [APÊNDICE 2].



## 2. TEORIA DE OPERAÇÃO DOS ACELERÔMETROS

A primeira seção desenvolve equações para o dimensionamento da mesa vibratória, especificamente as equações 2.6, 2.7 e 2.15. As seções seguintes apresentam os materiais piezoelétricos e a estrutura básica dos acelerômetros construídos com eles.

### 2.1 Vibração de um Ponto Material

A vibração de objetos (como um acelerômetro) pode ser estudada como a vibração de um ponto (seu centro de massa), como uma aproximação válida até frequências distantes de uma década da sua frequência de ressonância mecânica. Conceituamos vibração de um ponto como um movimento do ponto em torno de uma origem, que não produz deslocamento acumulado (isto é, na média temporal o ponto permanece parado). Quanto ao caráter, a vibração pode ser periódica ou randômica, onde periódica significa que o movimento se repete exatamente em certos períodos de tempo.

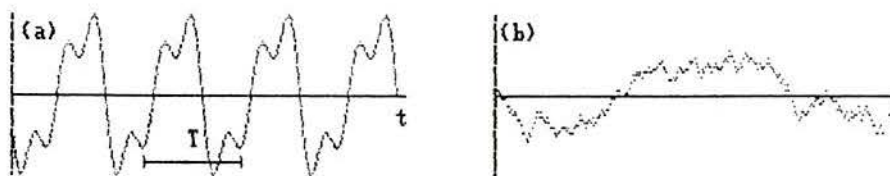


Fig 2.1 - Vibração periódica e vibração randômica

Para o equacionamento dos testes que serão propostos, vamos considerar o caso mais simples da *Vibração Harmônica*, onde a posição  $h(t)$  (usaremos altura) do ponto varia sinusoidalmente com o tempo  $t$ . É importante notar que vibrações periódicas mais complexas podem ser

estudadas como a superposição de várias harmônicas simples.

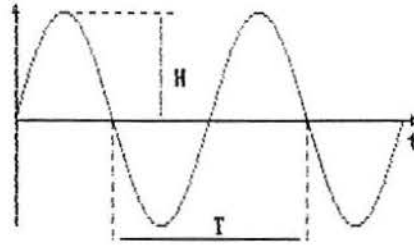


Fig 2.2 - Vibração Harmônica (sinusoidal) de um ponto

2.1.1 Cinemática- assumiremos desde o início o estudo de uma mesa vibratória, onde a altura  $h$  varia sinusoidalmente com o tempo  $t$ , conforme a Fig 2.2. Podemos observar que existe uma altura máxima e outra mínima a partir da origem, que chamamos  $h_{pico}$ , ou, mais sucintamente,  $H$ . Verificamos que após um tempo  $T$  (período), a altura se repete, e estabelecemos as grandezas:

a) *Frequência da vibração* [ Hz ]

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

b) *Frequência angular* [rad/s ]

$$\omega = 2 \pi f \quad (2.2)$$

de onde a equação do movimento harmônico simples fica dada pelo

c) *Deslocamento (altura)* [ mm ou  $\mu\text{m}$  ]

$$h(t) = H \text{ sen } (\omega t) = H \text{ sen } \left( 2\pi \frac{t}{T} \right) \quad (2.3)$$

que, sendo variável com o tempo, também expressa

d) *Velocidade* [ mm/s ]

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \omega H \cos (\omega t) = V \cos (\omega t) \quad (2.4)$$

que por sua vez, também é sinusoidal, e portanto traduz aceleração.

e) Aceleração<sup>1</sup> [ G ]

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 H \sin(\omega t) = -A \sin(\omega t) \quad (2.5)$$

Das equações acima, é importante notar, partindo da aceleração como causa do movimento, que a velocidade acompanha a senóide da aceleração com um atraso de  $90^\circ$  ( $\pi/2$ ), e que o deslocamento também segue a velocidade com um atraso de  $90^\circ$ . Também é essencial relacionar as amplitudes da velocidade e do deslocamento produzidos por uma aceleração (em módulo):

$$V = A / \omega \quad (2.6)$$

e 
$$H = A / \omega^2 \quad (2.7)$$

que permitem o dimensionamento mecânico da mesa excitadora para uma faixa de aceleração e frequência de trabalho.

Para dar referência mais simples às amplitudes dos movimentos vibratórios, mais especificamente dos periódicos, define-se valor médio ( $H_{med}$ ) e valor médio quadrático ( $H_{rms}$ ), como

f) Deslocamento Médio

$$H_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T |h| dt \quad (2.8)$$

g) Deslocamento RMS (médio quadrático)

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T h^2(t) dt} \quad (2.9)$$

e para o movimento vibratório harmônico.

$$H_{rms} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} H, \quad H_{med} = \frac{1}{2\sqrt{2}} H$$

**2.1.2 Dinâmica-** Quando um sistema mecânico puntual é excitado por forças externas  $f(t)$ , responde à excitação com um movimento  $h(t)$ , segundo uma característica que depende de 3 parâmetros: sua massa ( $M$ ), seu coeficiente elástico ( $K_s$ ) e o coeficiente de amortecimento ( $B$ ), conforme o diagrama simplificado seguinte

<sup>1</sup>Na medição de vibrações, utilizaremos a unidade G equivalendo à aceleração normal da gravidade ( $G = 9,80665 \text{ m/s}^2$  [ABNT/82] )

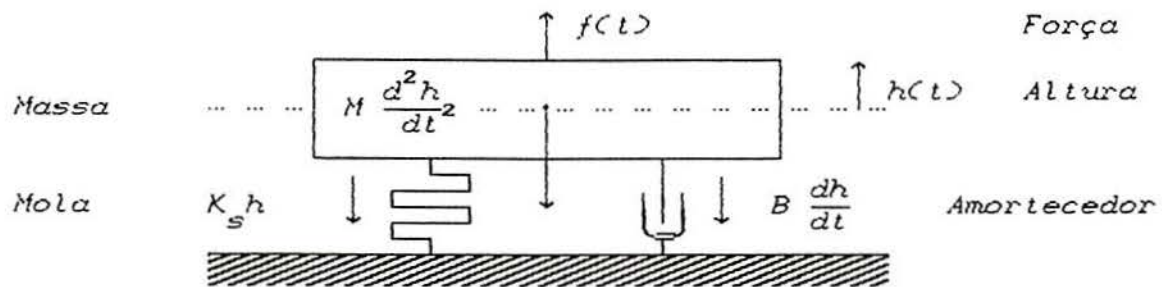


Fig 2.3 - Modelo de sistema com um grau de liberdade

O equacionamento do movimento resultante da aplicação da força de excitação ao sistema mecânico fornece

$$M \frac{d^2 h}{dt^2} + B \frac{dh}{dt} + K_s h = f(t) \quad (2.10)$$

A solução do movimento  $h(t)$  resultante pode ser feita pela aplicação da Transformada de Fourier e do princípio da superposição, resultando em um coeficiente  $R(f)$  (no domínio frequência), ou *Resposta do Sistema*. Tomando uma excitação harmônica, representada por  $f(t) = F_0 \sin(\omega t) = F_0 e^{j\omega t}$ , temos

$$H(f) = R(f) F_0 e^{j2\pi f t} \quad (2.11)$$

onde

$$H\left(\frac{f}{f_0}\right) = \frac{1/K_s}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + j \frac{1}{Q} \frac{f}{f_0}} \quad (2.12)$$

que introduz os parâmetros  $f_0$  e  $Q$ , respectivamente,

a) *Frequência de ressonância*, dada por

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_s}{M}} \quad (2.13)$$

b) *Fator de qualidade*, dado por

$$Q = \frac{1}{B} \sqrt{K_s M} \quad (2.14)$$

A existência de uma frequência de ressonância torna a resposta do sistema irregular a uma varredura da frequência de excitação que a inclua ou dela se aproxime, e portanto é um parâmetro a ser minimizado em termos de  $Q$ , e afastado da faixa de interesse em termos de  $f_0$ , para o melhor desempenho de um sistema de controle de amplitude e frequência da excitação.



A mesa excitadora deste projeto tem suspensão magnética, e baixo coeficiente de atrito com mancais (cuja única função é manter a posição vertical do conjunto vibratório), portanto  $K \rightarrow 0$  e  $Q \rightarrow 1$ , o que aproxima bastante a resposta  $h(t)$  da excitação sinusoidal  $f(t)$ .

Baseados nesta peculiaridade, estudamos a potência necessária para o acionamento de um sistema ideal - sem coeficiente elástico e sem amortecimento - de uma forma simplificada. Considerando o estudo de um ciclo, a energia fornecida ao sistema é

$$E = \Delta K + \Delta U$$

ou seja, as variações das energias cinética e potencial. Quanto à energia cinética, se considerarmos a passagem pelo ponto central, em um instante  $t_0$ , com o ponto subindo, e em um instante  $t_1$  com o ponto descendo (mesma velocidade em sentido contrário), com massa  $M$ , temos:

$$\Delta K = K_1 - K_0 = \frac{M \Delta V^2}{2} = \frac{M (V_1 - V_0)^2}{2}$$

Mas, lembrando que  $|V_1| = |V_0| = A/\omega$ ,

então  $V_1 - V_0 = A/\omega - (-A/\omega) = 2A/\omega$

ou seja,  $\Delta K = \frac{2M A^2}{\omega^2} \times 2$  (igual para os 2 semiciclos)

ou  $\Delta K = \frac{4M A^2}{\omega^2}$

que é a energia fornecida ao conjunto vibratório durante um ciclo, para promover as mudanças da velocidade do mesmo. Para a energia potencial, com forças não conservativas (sem elemento elástico), temos no pior caso de fornecer a energia para a elevação do conjunto de  $-H$  para  $+H$ , ou seja

$$\Delta U = M G 2H = \frac{2 M G A}{\omega^2}, \quad (\text{porque } H = A/\omega^2)$$

Para a *potência consumida* ( $W = \Delta E / \Delta t$ ) lembramos que  $\Delta t = T = 1/f$ , e que  $\omega = 2\pi f$ , que substituídos fornecem

$$W = \frac{M}{f} \left[ \frac{A^2}{\pi^2} + \frac{G A}{2} \right] \quad (2.15)$$

que expressa a potência necessária para excitar uma massa  $M$  com uma vibração no sentido vertical, de aceleração com amplitude  $A$  e frequência  $f$ .

**2.1.3 Análise espectral-** O método de análise de frequências, baseado no teorema de Fourier, estabelece que qualquer função periódica pode ser vista como uma combinação de uma série de curvas sinusoidais puras com frequências distintas e múltiplas harmônicas da frequência da função original

$$f(t) = X_0 + X_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + X_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + X_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

Estes vários elementos constituem o espectro de frequência da vibração. Na utilização de acelerômetros para análise vibratória, o espectro da vibração de um equipamento pode ser levantado passando-se o sinal coletado pelo acelerômetro por um filtro passa-banda estreito e sintonizável, com o qual se pode varrer uma faixa de frequências observando as amplitudes dos picos em certas frequências. Relacionando as frequências dos picos com a frequência básica do equipamento (rotativo), pode-se chegar a um diagnóstico acurado de vários tipos de problemas em desenvolvimento no equipamento em inspeção.

## 2.2 Materiais Piezoelétricos

Piezoeletricidade é uma propriedade apresentada por materiais cuja célula unitária do sistema cristalino apresenta uma assimetria de cargas, e que resulta no aparecimento de uma carga elétrica estática quando o cristal é submetido a tensões mecânicas. Assim, o cristal age como um transdutor de tensão mecânica em tensão elétrica.

Os materiais piezoelétricos mais comumente utilizados na confecção de acelerômetros são cerâmicas baseadas em Titanato de Bário e Zirconato de Chumbo/Titanato de Chumbo, havendo também aplicações especiais de Metaniobato de Chumbo e Titanito de Sódio e Bismuto. A utilização de cerâmicas permite a moldagem adequada dos corpos transdutores antes do cozimento. As cerâmicas são compostas de muitos cristais em orientação randômica, cada célula unitária

contendo um dipolo. Pela aplicação de eletrodos e um forte campo CC, um certo número de dipolos se alinha paralelo ao campo, tornando a cerâmica piezoelétrica [EDO/85].

**2.2.1 Taxa de envelhecimento-** expressa a tendência da cerâmica de voltar ao seu estado original anterior à polarização. A taxa de envelhecimento define a mudança dos parâmetros por década de tempo (1-10 dias, 5-50 dias, etc.). Para os materiais citados, situa-se entre 1 e 5%/década. Esta característica mostra a importância da aferição periódica destes transdutores, para a manutenção de uma faixa de precisão adequada nos instrumentos que os utilizam.

**2.2.2 Temperatura Curie-** é a temperatura na qual, devido à agitação térmica, o cristal muda da forma assimétrica para uma forma simétrica (não piezoelétrica), expressa em graus Celsius. Para as cerâmicas mais comuns, esta temperatura varia entre 115°C e 350°C, mas as cerâmicas especiais como o Metaniobato de Chumbo atingem mais de 400°C, e o Titanito de Sódio e Bismuto 660°C (que entretanto têm baixa sensibilidade).

### 2.3 Transdutores Piezoelétricos de Aceleração

Os elementos básicos de um acelerômetro piezoelétrico são os indicados na figura seguinte.

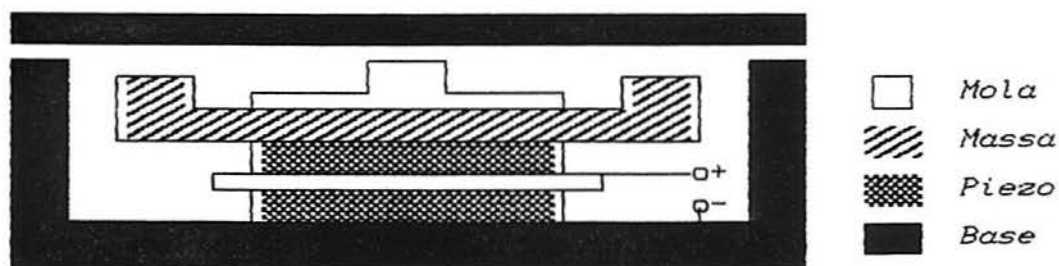


Fig 2.4 - Montagem básica de um acelerômetro

A mola mantém a massa de prova solidária ao elemento piezoelétrico, e este à base, sendo apertada com uma força superior à maior força possível, dentro da faixa destinada ao uso do instrumento. Este procedimento garante que sob uma aceleração vibratória (ciclos



positivos e negativos) o transdutor não deixe de atuar sob compressão. Esta força permanente não acarreta uma tensão de regime, como se verá nas características do transdutor.

O funcionamento do conjunto é o seguinte: em regime permanente, a massa de prova encontra-se em repouso em relação à base, e nenhuma força atua além da pressão da mola. Uma aceleração externa é aplicada à base, que a transmite ao cristal, e este à massa de prova. A comunicação de uma aceleração à massa de prova corresponde a uma força de reação, ditada pela sua inércia, e proporcional à massa, força esta que atua sobre o cristal. Esta força proporcional à aceleração  $x_i''$  é transformada em deformação  $x$  nos terminais do cristal.

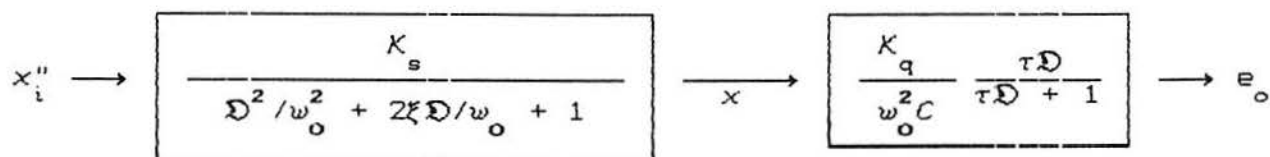


Fig 2.5 - Conversão aceleração/tensão nos terminais<sup>2</sup>

O deslocamento da base é transmitido por um sistema de acoplamento elástico, mostrando que o conjunto é um instrumento de segunda ordem. A deformação do cristal é convertida em tensão  $e_o$  nos terminais do mesmo através do bloco diferenciador do diagrama, o que provoca a extinção de tensão para deformações permanentes, após o decurso de uma constante de tempo  $\tau$ .

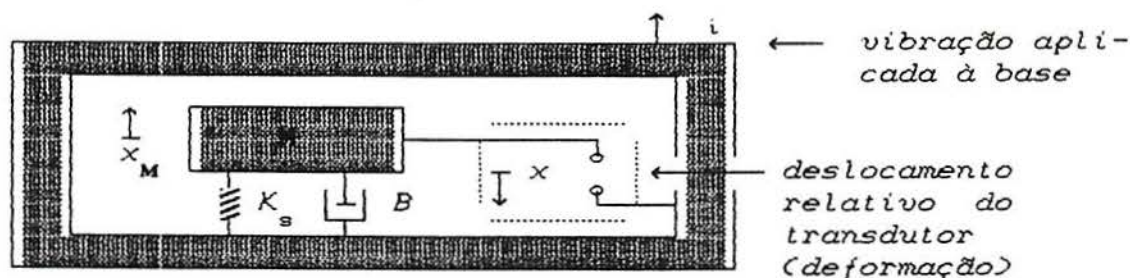


Fig 2.6 - Transmissão da aceleração ao transdutor

<sup>2</sup>A notação  $D$  nos blocos significa a aplicação do operador diferencial com relação ao tempo ( $d/dt$ ) à variável de entrada do bloco.



O exame do comportamento mecânico do transdutor, descrito pelo primeiro bloco, fornece

$$\frac{x}{x_i}(\omega) = \frac{\omega_o^2 / \omega^2}{\omega^2 / \omega_o^2 + 2\xi \omega / \omega_o + 1} \quad (2.16)$$

onde  $\omega_o = 2\pi f_o = \sqrt{K_s / M}$  (2.17)

e  $\xi = \frac{1}{2Q} = \frac{B}{2 \sqrt{K_s M}}$  (2.18)

são respectivamente a frequência natural e o amortecimento do conjunto. Vale comentar que  $K_s$  costuma ser muito grande, e  $B$  muito pequeno, e que a frequência natural de conjuntos usuais de acelerômetros está na faixa de 10-30 kHz.

### 3. ENSAIOS E CALIBRAÇÃO

#### 3.1 Principais Características e Interferências

Como um dispositivo de uso, um acelerômetro é um transdutor de *aceleração* para *tensão*, e sua principal característica é a sensibilidade, medida em mV/G.

A tabela seguinte ilustra as variáveis passíveis de determinação em uma calibração básica (de verificação individual permanente de cada dispositivo) e suplementar (executada sobre amostras de lotes de fabricação), marcadas com ■ as atendidas por este equipamento.

TABELA II

*Calibração ou Teste para Acelerômetros Piezoelétricos*

Básica	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Sensibilidade</li> <li>■ Resposta em Frequência</li> <li>□ Capacitância do Transdutor</li> <li>□ Resistência de Isolamento</li> </ul>
Suplementar	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ Dimensões</li> <li>■ Peso</li> <li>□ Massa Dinâmica Final</li> <li>□ Rigidez do Transdutor</li> <li>□ Polaridade</li> <li>□ Deslocamento de Fase</li> <li>□ Resposta em Temperatura</li> <li>■ Linearidade em Amplitude</li> <li>□ Frequência de Ressonância</li> <li>□ Sensibilidade Transversal</li> <li>□ Selagem</li> <li>□ Limite de Aceleração</li> <li>□ Limite de Temperatura</li> <li>□ Sensibilidade a Deformação</li> <li>□ Sensibilidade Eletromagnética</li> <li>□ Sensibilidade Piroelétrica</li> </ul>

FONTE: [ANS/69]

3.1.1 Sensibilidade - Para qualquer acelerômetro real, a sensibilidade será uma função da amplitude e da frequência da aceleração -  $S(\alpha, \omega)$  - que pode ser considerada  $S$  constante, entre limites de uso  $\omega_{\min}$  e  $\omega_{\max}$ . Uma mudança de  $\pm 10\%$  na sensibilidade (medida em mV/G) entre ensaios sucessivos usualmente indica que o desempenho do transdutor mudou significativamente.

Esta calibração é usualmente feita em frequência de 100 Hz e amplitudes menores que 10 G [ANS/69]. Este equipamento indica a sensibilidade  $S$  (1 G, 100 Hz).

3.1.2 Resposta em Frequência - Para esta calibração, o transdutor é excitado com uma aceleração sinusoidal de amplitude fixa, em pelo menos 7 frequências da faixa 5-2000 Hz (finalidade geral), com a medição do sinal de saída correspondente. Um desvio de qualquer das medidas de mais do que 10% significa que o mesmo deve ser ajustado ou substituído.

3.1.3 Capacitância do Transdutor - Esta medida se aplica a transdutores que não incorporam um amplificador no corpo selado. Para transdutores com amplificador incluído, a capacitância é fornecida pelo fabricante. Para este teste, o transdutor é excitado na frequência da determinação da sensibilidade (100 Hz) e em uma segunda frequência (usualmente 1 kHz), com a determinação da capacitância em cada ponto. A diferença em relação à capacitância na primeira frequência não deve exceder 10% .

3.1.4 Resistência de Isolamento - É efetuada em CC, entre os terminais do transdutor e seu envólucro, particularmente a superfície de montagem.

3.1.5 Dimensões - São altura, largura, comprimento e diâmetro, incluindo diâmetro e profundidade/altura de furo/parafuso de montagem, mais a especificação da rosca respectiva. Também devem ser especificados as dimensões e tipo do conector e cabo.

3.1.6 Peso - Especificação do peso total, excluídos cabos e pinos/parafusos de montagem.

3.1.7 Massa Dinâmica Final - Refere-se à massa de prova, fixada ao transdutor através do elemento piezo-elétrico, e é normalmente especificada pelo fabricante.

3.1.8 Rigidez do Transdutor - É a rigidez mecânica estática do transdutor, normalmente fornecida pelo fabricante.

3.1.9 Polaridade - É medida por um método comparativo verificando que uma variação positiva na saída seja produzida por um estímulo mecânico aplicado na direção [superfície de montagem] → [extremidade oposta do transdutor] ao longo do eixo de sensibilidade máxima.

3.1.10 Deslocamento de Fase - Normalmente não é revelante em acelerômetros piezoelétricos, visto seu amortecimento ser menor do que 0,1 do amortecimento crítico. Entretanto, o uso dos filtros ou seguidores de catodo pode requerer sua avaliação à medida que o deslocamento de fase varie com a frequência.

3.1.11 Resposta em Temperatura - O transdutor em ensaio é montado em uma câmara térmica e ensaiado em patamares de temperatura da faixa de uso, em frequência usualmente até 500 Hz. Muito cuidado deve ser tomado ao utilizar outro acelerômetro de referência, para que haja adequado isolamento térmico mas muito baixo isolamento mecânico, isto é, que o movimento seja transmitido igualmente aos dois acelerômetros.

3.1.12 Linearidade em Amplitude - Dentro das limitações de sobrecarga do dispositivo em ensaio, a calibração é efetuada no mínimo até 100 G por uma excitação sinusoidal não excedendo 500 Hz. Os desvios de linearidade são calculados a partir da razão entre as saídas do transdutor em ensaio e o de referência e devem ficar dentro de  $\pm 2\%$  na faixa de uso, para transdutores utilizados em medição de vibrações.



3.1.13 Frequência de Ressonância - Pode ser determinada com o dispositivo suspenso pelo seu cabo, e excitado sinusoidalmente em uma varredura da frequência, até que a tensão e a corrente de saída estejam em fase. A montagem do acelerômetro sobre outra superfície a medir modifica esta frequência de ressonância. A frequência de ressonância não montado fica normalmente entre 10 e 20 kHz.

3.1.14 Sensibilidade Transversal - Excitação sinusoidal de frequência em torno de 500 Hz é aplicada com o acelerômetro montado perpendicularmente ao sentido do movimento. Se a sensibilidade transversal excede 5% da sensibilidade axial, o dispositivo necessita reparos.

3.1.15 Selagem - Um teste de selagem consiste em imergir o acelerômetro com os cabos retirados em um recipiente de paredes transparentes, contendo água aquecida a cerca de 95°C. Um fluxo contínuo de bolhas liberadas pelo transdutor revela falha na selagem.

3.1.16 Limite de Aceleração - Define a aceleração máxima que pode ser aplicada ao transdutor sem degradação de seu desempenho. É verificada pela aplicação de trens de choque de 100 meias-ondas sinusoidais em 3 direções mutuamente perpendiculares, com amplitude dentro de  $\pm 10\%$  do limite especificado pelo fabricante.

3.1.17 Limite de Temperatura - O transdutor é deixado estabilizar por 4 horas em ambiente mantido na temperatura máxima e mínima especificadas, após o que as calibrações básicas são repetidas para o levantamento de alterações no desempenho.

3.1.18 Sensibilidade a Deformação - O acelerômetro é montado sobre uma barra de aço retangular de seção reta 3" x 0,5" (7,5 x 1,25 cm), engastada em um suporte rígido, com uma extensão livre de 57" (145 cm), e com *strain-gages* montados para monitoramento, junto ao acelerômetro, a 1,5" da extremidade engastada. A barra é tangida com a mão, e as saídas do acelerômetro e dos S-G registradas graficamente. Um ponto de deformação  $250 \times 10^{-6}$  é localizado e

calculado o erro entre os registros do acelerômetro e dos S-G.

3.1.19 Sensibilidade Eletromagnética - O transdutor deve ser montado sobre uma base de cerca de 5 kg de material não magnético, como chumbo. Um campo magnético vibratório de 60 Hz e amplitude conhecida é imposto, e o transdutor girado, anotando-se o maior valor da saída, em uma equivalência G por gauss.

3.1.20 Sensibilidade Piroelétrica - É determinada com o transdutor fixo a um bloco de alumínio com pelo menos dez vezes a sua massa, imergindo-se ambos em um banho com gelo a uma temperatura cerca de 25°C abaixo da ambiente, e registrando-se a maior tensão de saída em um osciloscópio CC.

### 3.2 Equipamento viável

Dentre as características discutidas, este equipamento mede o peso, a sensibilidade e as respostas em amplitude e frequência, que são fundamentais ao desempenho do transdutor. Estes ensaios, que são feitos dentro de limites mais estreitos de operação, visam homologar seu uso, ao invés de estender as faixas para cobrir a capacidade máxima do transdutor, o que seria mais difícil de dimensionar e elevaria desproporcionalmente o custo do equipamento.

Ao dimensionar as faixas de uso, temos de escolher a massa máxima do acelerômetro a excitar. Tomamos 350g (como o acelerômetro mod.4322 da B&K, por exemplo), cobrindo mais de 90% das linhas convencionais de transdutores, que acrescidos de 150g da montagem da mesa, fornecem uma massa máxima de 0,5kg a excitar.

A potência necessária é uma função da frequência, da amplitude da aceleração e da massa a excitar. No ensaio de resposta em amplitude, a norma aconselha 100G/500 Hz. Já o ensaio de resposta em frequência projeta a faixa 5-2000 Hz, em amplitude qualquer. Assumindo os valores de 1 G, 10 G, 100 G, 5 Hz, 500 Hz e 2000 Hz, e a partir do equacionamento dinâmico do capítulo anterior (2.15), calculamos as potências na tabela III.

TABELA III

*Potência de acionamento de mesa vibratória  
(Massa= 0,5 kg)*

Frequência	Aceleração (o-pico)		
	1G	10G	100G
5 Hz	6 W	146 W	10 kW
500 Hz	58 mW	1,4 W	102 W
2000 Hz	14 mW	364 mW	25 W

A excitação nas frequências mais altas não demanda potência expressiva, e a excitação até as acelerações mais elevadas pode ser feita a uma frequência arbitrária conveniente. Para aprovisionar 100 G em 60 Hz, por exemplo, necessita-se cerca de 800 W.

A medição das grandezas de frequência e amplitude de aceleração deve ser feita para a comparação com o sinal de saída do transdutor em ensaio. Isto pode ser feito através de um acelerômetro de referência, ou pela medição das grandezas fundamentais do movimento por outros métodos. A alternativa introduzida por este equipamento é a da utilização de um *encoder*, para a geração de pulsos a intervalos constantes de distância, e comparação com a base de tempos do cristal de um microcontrolador. Por outro lado, como a amplitude do deslocamento da vibração diminui com o quadrado da frequência, a varredura ao longo de 3 décadas de frequência condiciona amplitudes 6 décadas menores. Estas amplitudes são menores que a graduação do *encoder*, impondo um limite da faixa de ensaio, pela impossibilidade de bem amostrar a amplitude da vibração.

Já as grandes amplitudes de deslocamento que ocorrem nas baixas frequências podem exceder o curso disponível da mesa, estabelecendo outra fronteira de situações de uso.

Para estudar convenientemente a faixa de utilização do equipamento e suas restrições, um programa foi elaborado que produz um mapa das



mesmas. A Fig 3.1 mostra o gráfico, para as restrições correntes desta mesa vibratória. As ordenadas indicam a aceleração em G, em escala logarítmica. As abcissas indicam a frequência de utilização, em Hz, também em escala logarítmica. Cotadas na linha horizontal superior do gráfico estão linhas inclinadas resultantes do cálculo de potências pela Eq 2.15. Uma linha oblíqua à direita ilustra a fronteira para amplitude de deslocamento menor que 2 intervalos do *encoder*, segundo a Eq 2.7. Com a mesma inclinação, porém à esquerda, uma linha delimita a fronteira aquém da qual a amplitude da vibração excede o curso da mesa vibratória. A área central entre estas linhas e abaixo da linha de potência do equipamento é a região de trabalho útil que se pode usar.

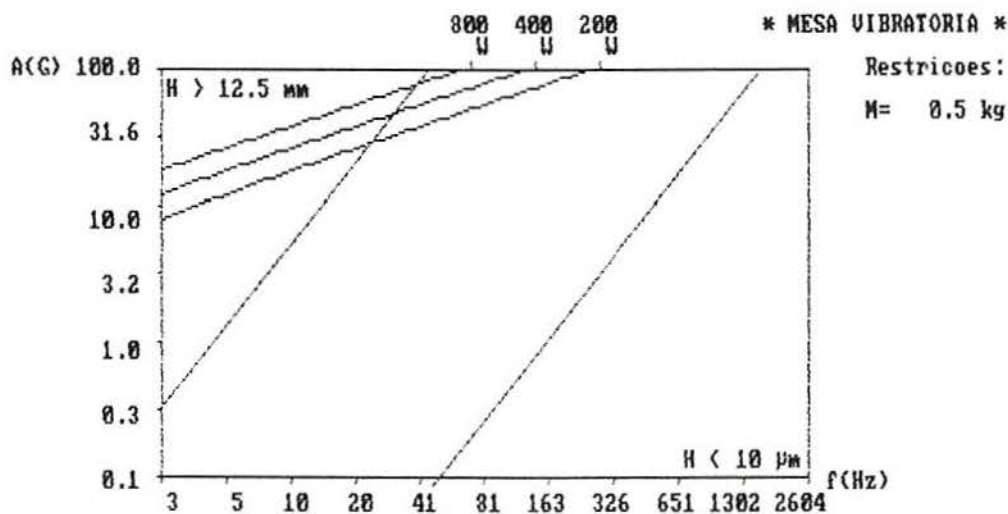


Fig 3.1 - Diagrama de fronteiras da mesa vibratória

O atuador principal da mesa compõe-se de 2 conjuntos magnéticos WPU da Selenium, com um campo de entreferro de 11,5 kGauss e bobinas para uma potência individual de 400 W cada. Para amostragem do deslocamento foi utilizado um *encoder* da Diadur (Heidenheim) com graduação de 20 μm e resolução de 5 μm. O curso útil das bobinas é 25 mm pico-a-pico, ou 12,5 mm de pico. Estas são as restrições plotadas no gráfico da Fig 3.1.



### 3.3 Ensaios Implementados

3.3.1 Peso - uma tensão de patamar é gerada para elevar a mesa a uma posição central, medida por um *proximeter* proporcional e realimentada. Esta tensão de manutenção é digitalizada e processada para a obtenção do peso em gramas-força, de que se abate o peso da mesa (já medido e armazenado no programa) para a obtenção do peso do transdutor.

3.3.2 Sensibilidade - o sinal produzido pelo transdutor em ensaio é retificado e o valor RMS digitalizado e adquirido durante o ensaio de resposta em amplitude. A declividade entre os pontos inicial e final do ensaio ( $0\text{ G}$ ,  $G_{\max}$ ) é calculada em mV/G e impressa na curva de calibração produzida.

3.3.3 Curva de resposta em Amplitude - o acelerômetro em ensaio é excitado a uma frequência constante de cerca de 40 Hz, em patamares de amplitudes de aceleração de 0 a 100 G, em 5 a 10 passos por varredura, e as tensões RMS amostradas e memorizadas em uma tabela. A faixa de ensaio é percorrida 4 vezes, de forma contínua (0-100%-0-100%-0), formando uma tabela de pares ordenados (aceleração medida; tensão RMS de saída).

A partir da tabela adquirida, os valores são processados para o cálculo da sensibilidade e dos pontos críticos (linearidade, histerese e repetibilidade) e exibição dos resultados, na forma ilustrada pela Fig 4.1.

Os valores são normalizados na faixa 0-100% e plotados com um eixo horizontal de 4 setores (um por corrida de ensaio) e 5 eixos verticais que os delimitam. Os pares ordenados adquiridos são indicados individualmente por pontos no espaço X-Y, e os 3 pontos críticos unidos aos seus determinantes por linhas tracejadas. Os eixos são subdivididos em intervalos de 10% e os pontos extremos de tensão de saída e aceleração graficados ao lado (Ver Apêndice A.2).

3.3.4 Curva de resposta em frequência - a varredura é feita em 2 estágios com amplitude de aceleração constante cada um. No primeiro estágio, com uma aceleração de 0,5 G, a frequência é incrementada em patamares de 1 oitava, desde 5,1 Hz até 40,7 Hz, respeitando a amplitude de deslocamento máxima para as baixas frequências. No segundo estágio, a amplitude da aceleração é elevada para cerca de 100 G, e a frequência elevada em oitavas até 1306 Hz, respeitando a amplitude de deslocamento mínimo para detecção pelo *encoder*. A saída normalizada é plotada em função da frequência de excitação, com os pontos unidos por uma linha pontilhada de interpretação, eixos de ordenadas (tensão de saída em dBm) e de abcissas (logarítmico em Hz).

#### 4. DESCRIÇÃO FUNCIONAL DO EQUIPAMENTO

##### Descrição geral e diagrama de blocos

O equipamento implementado é referido como Calibrador para Transdutores de Vibração (CTV), e é representado no diagrama de blocos da Fig 4.1. Um programa específico executa os ensaios, emite os resultados e permite a configuração de parâmetros pelo operador.

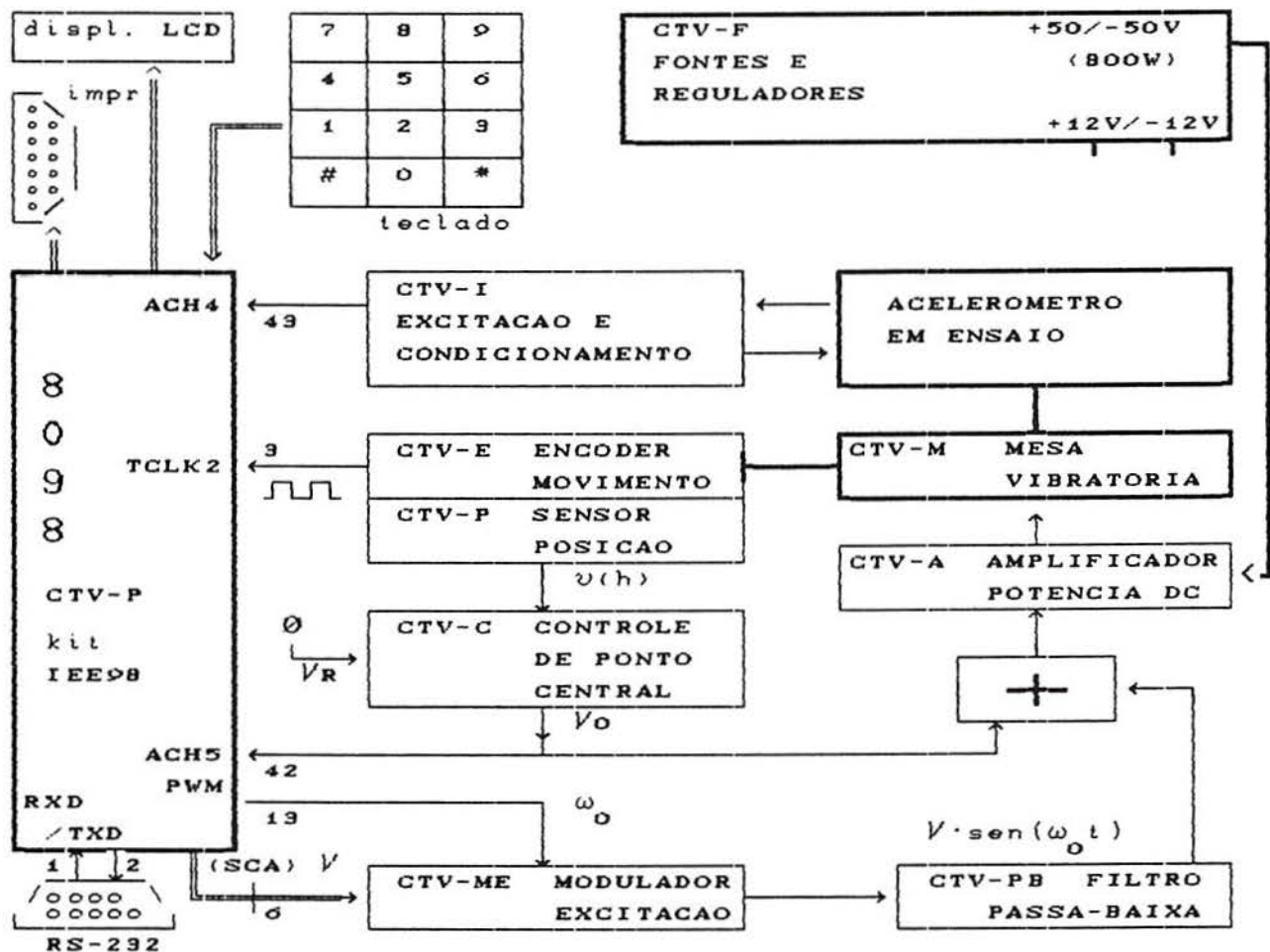


Fig 4.1 - Calibrador para Transdutores de Vibração  
Diagrama de Blocos do Equipamento

O equipamento é constituído de um alojamento único, com alças para transporte e cabo de alimentação 127/220V (1 kVA). Externamente o alojamento divide-se em 2 áreas - mesa vibratória e painel de operação. Na lateral do painel de operação há 2 conectores, um paralelo padrão CENTRONIX para conexão de uma impressora EPSON ou similar, e um conector DB-9 trapezoidal para conexão serial com um microcomputador (opcional).

#### 4.1 Mesa Vibratória (CTV-M)

A mesa é construída em torno de 2 núcleos magnéticos para *voice-coil*, modelo WPU, conforme mostrado na Fig 4.2. Os núcleos toroidais são montados em oposição, com as aberturas para o lado externo, e sob compressão, por se oporem polos de mesmo nome.

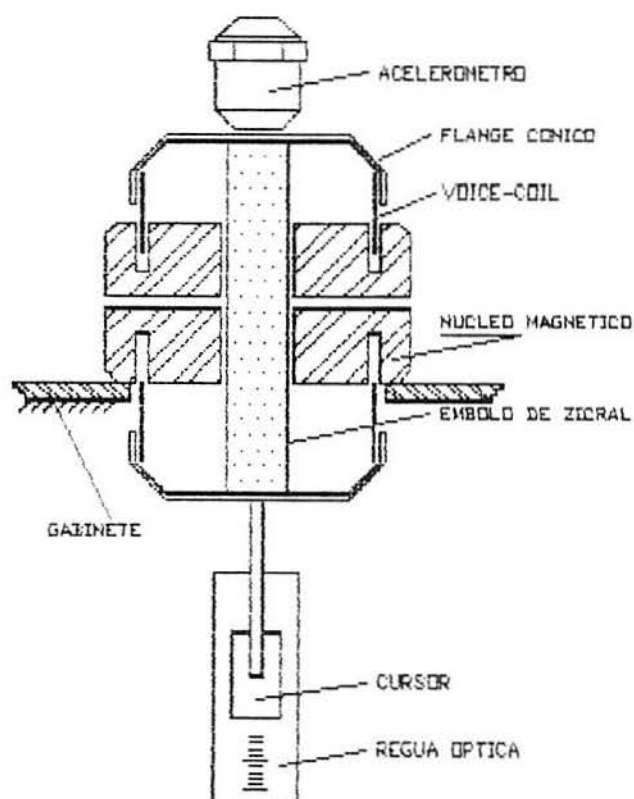


Fig 4.2 - Diagrama esquemático da mesa excitadora

A compressão dos polos iguais diminui as linhas do fluxo disperso e concentra o fluxo no entreferro, melhorando o desempenho. Além disso, os solenóides trabalhando em oposição compensam entre si o



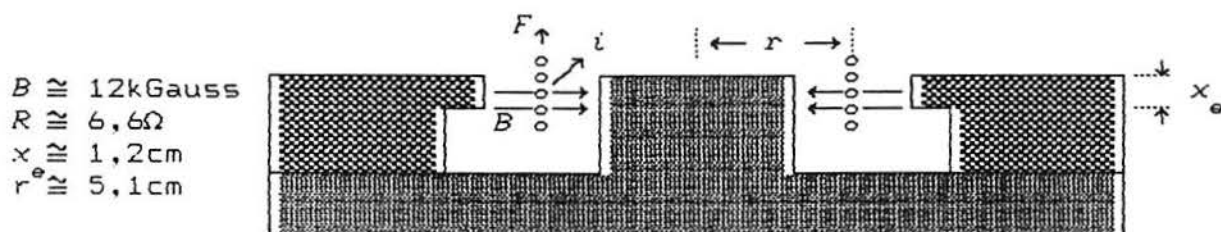
número de espiras apresentado ao entreferro, quer dizer, quando o movimento conjugado dos solenóides introduz uma espira adicional em um dos lados, subtrai automaticamente uma espira do lado oposto, fazendo com que a ação corrente/força permaneça constante ao longo de todo o curso, como se observa na Fig 4.3.



Fig 4.3 - A soma do número de espiras apresentadas ao entreferro é mantida constante da situação (a) para (b) pela conjugação dos solenóides

#### 4.1.1 Força nas Bobinas

Para avaliação da força disponível nas bobinas, consideramos a extensão no entreferro, como indicado na Fig 4.4 por  $x_e$ .



$B \cong 12 \text{ kGauss}$   
 $R \cong 6,6 \Omega$   
 $x \cong 1,2 \text{ cm}$   
 $r^e \cong 5,1 \text{ cm}$

Fig 4.4 - Força gerada nas bobinas (WPU/Selenium)

$\varnothing_{\text{fio}} =$	2,1 mm
# esp.no entreferro=	$N = x_e / \varnothing_{\text{fio}} = 12 / 2,1 \cong 6 \text{ esp}$
$L = N \cdot 2\pi r =$	$6 \cdot 2\pi \cdot 5,1 \cong 192 \text{ cm}$
Campo no entreferro=	11,5 a 12 kGauss
Potência na bobina=	400 W ( $R = 6,6 \Omega$ ; $I = 7,8 \text{ A}$ )
Força máxima=	$\mathcal{B} \text{ i } L = 12 \times 10^3 \cdot 7,8 \cdot 192 \text{ (cm)}$ $\cong 18 \times 10^6 \text{ dinas} \cong 180 \text{ N}$ $\cong 18 \text{ kgf (1 bobina)}$
Aceleração p/M=0,5 kg=	$2 \cdot 180 / 0,5 \cong 720 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cong 73 \text{ G (2 bobinas)}$

#### 4.1.2 Descrição mecânica

A conjugação dos solenóides é feita através de um êmbolo central, que atravessa os toróides magnéticos e termina por flanges dos dois lados, aos quais são fixadas as bobinas (Anexo a1-3). O êmbolo é constituído de Zicral, liga Zn-Cr-Al fabricada na Europa para ultra-leves, de alta relação resistência/massa.

O êmbolo movimenta-se dentro de uma bucha de nylon, que possui um flange externo central para acomodar a compressão dos núcleos magnéticos, montados em ambos os lados (Anexo a1-2). Os toróides possuem um orifício central cônico, cuja abertura fica para fora. Após a montagem sobre a bucha de nylon e o alinhamento do êmbolo, a parte livre do cone é preenchida com massa especial para garantir a rigidez do conjunto.

Duas placas de contenção fixam os conjuntos magnéticos e os pressionam um contra o outro, através de parafusos tensores. As placas possuem um canal circular usinado próximo ao vão do entreferro, que se abre para este através de uma série de pequenos orifícios, igualmente espaçados ao redor de todo o perímetro central interno da placa. O canal é pressurizado e o ar que sai pelos orifícios tem a função de refrigerar os solenóides, sem desbalancear o êmbolo por um sopro localizado. Uma câmara é usinada em um ponto da circunferência, com um bocal para a adaptação da mangueira injetora de ar de refrigeração.

Como se pode observar no diagrama do anexo a1-3, os flanges (3), que unem o êmbolo aos solenóides, são perfurados para menor atrito aerodinâmico, e nervurados para maior rigidez com mínima massa, usinados em alumínio e balanceados. Os tubos suporte dos solenóides são colados aos flanges após o alinhamento, com adesivo.

Na extremidade inferior do êmbolo são fixadas 2 estruturas. Uma haste mantém o cursor do *encoder* (9), para a leitura de movimentação diferencial, vertical. Esta haste possui uma fresagem em cunha (8), que ao deslocar-se frente à bobina de um sensor indutivo de

proximidade, varia a distância à mesma, produzindo um sinal analógico de altura absoluta da mesa, utilizado para a geração da tensão de pedestal  $V_0$ , que mantém a posição central da mesma.

#### 4.2 Técnica de Excitação da Mesa

A mesa deve ser excitada por um sinal sinusoidal, de amplitude e frequência controladas pelo microcontrolador, capaz de fornecer àquela uma potência de cerca de 800 W. A implementação desta excitação envolve os seguintes dispositivos:

- a) software de acionamento senoidal via PWM (*Pulse-Width-Modulation*) com frequência controlada
- b) porta digital de controle de amplitude estabelecida por programa (6 bits)
- c) conversor D/A (digital para analógico) para o sinal de saída do acelerômetro
- d) modulador do sinal PWM pelo sinal de amplitude
- e) filtro passa-baixa para exclusão da frequência de amostragem do PWM e seleção da harmônica principal
- f) processador do sinal de tensão de patamar para manutenção da posição central
- g) amplificador de potência do sinal composto e conversor V/I
- h) fontes de alimentação

**4.2.1 Software de acionamento senoidal via PWM** - A forma de onda da senóide é gerada através de uma tabela de valores com 8 bits de resolução, aproveitando um dispositivo interno do microcontrolador que gera os pulsos com precisão do *hardware*, e de relógio interno síncrono com o cristal oscilador para a troca de amostras do PWM.

Este sinal apresenta frequência e amplitude dos pulsos com a precisão do cristal oscilador, e é desenvolvido em detalhe no apêndice A1.

A tabela de frequências e o projeto do filtro específicos para o cristal de 12 MHz deste projeto são mostrados na Fig 4.5 (saída do programa-ferramenta de desenvolvimento), identificando um erro médio quadrático de apenas 0,2% devido à quantização da amplitude dos pulsos.



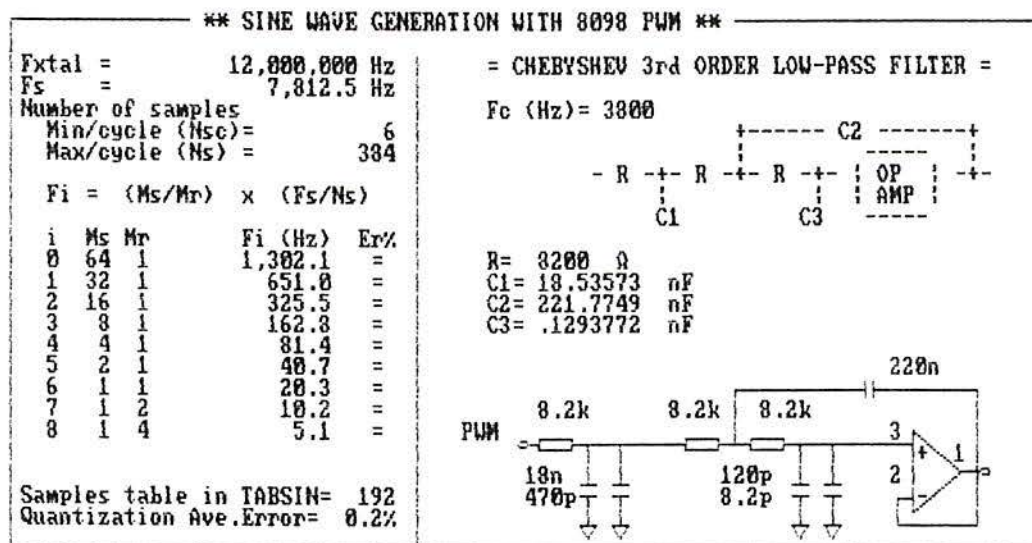


Fig 4.5 - Síntese das frequências c/ferramenta PWMSIN

**4.2.2 Modulador de Excitação (CTV-ME)** - A função deste módulo é produzir uma tensão sinusoidal do tipo  $V \cdot \sin(\omega t)$ , onde  $V$  é a amplitude da aceleração que se quer impor, e  $\omega$  a frequência. Este módulo tem os seguintes blocos:

a) **Porta Digital de Controle de Amplitude** - a porta SCA (Saídas Coletor-Aberto) do kit IEE98 é usada, com seus primeiros 6 bits (SCA<sub>1</sub> a SCA<sub>6</sub>). Os primeiros 5 bits são utilizados para a obtenção de uma tensão analógica em 32 níveis discretos, conforme o esquema CTV-ME do Anexo 2 (F1 3/5). O bit SCA<sub>6</sub> é usado como controle de ganho ( $\times 1$  /  $\times 10$ ). O endereço da porta SCA é 0xE000, na operação de escrita (IDWR0) do kit IEE98. Quando escrevendo uma nova amplitude (magnitude e ganho), é importante manter o valor do bit SCA<sub>7</sub> inalterado, visto se tratar de outra função (INIT).

O conversor D/A de 5 bits foi implementado pelo circuito discreto mostrado em CTV-ME no Anexo 2, adaptado de Stout-Kaufman. Os bits SCA<sub>1-5</sub> são encaminhados por inversores CMOS 4050, alimentados por tensão de referência +5V<sub>ref</sub>, que garante níveis 0,00 V e +5,00 V com 1 mV de precisão, e reforçados por amplificadores TL084, que alimentam uma rede R-2R, onde todos os resistores são de filme



metálico de mesmo valor  $2R$ , e os valores  $R$  obtidos por ligação em paralelo, garantindo uma boa uniformidade aos valores.

O valor analógico é amplificado pelo AMPOP USA, que permite o ajuste de zero em  $P_1$ , e o valor resultante alimenta o divisor  $R_{99} + P_2$ , regulado para  $1/10$ , onde a chave analógica U2 (4052) permite selecionar a divisão, produzindo tensões de saída  $V_b = V_a$  ou  $V_a/10$ , ao comando de SCAs.

b) Modulador PWM - O sinal analógico  $V_b$  é invertido simetricamente por U6D, e selecionado entre  $+V_b/-V_b$  pela chave analógica 4052 conforme o sinal PWM do microcontrolador, como pode ser observado no esquema. O sinal resultante  $V_{mod}$  é uma onda retangular com amplitude  $+V/-V$  controlada pela porta SCA, e aspecto temporal descrevendo uma senóide de frequência  $\omega$  em pulsos de largura variável.

4.2.3 Filtro Passa-Baixa (CTV-PB) - O sinal PWM  $V_{mod}$  é processado pelo filtro de terceira ordem Chebyshev 3dB mostrado no esquema. Este filtro é calculado para a frequência de corte de 3800 Hz, uma oitava abaixo da frequência de chaveamento das amostras (7.812 Hz) pelo programa-ferramenta PWMSIN.BAS, apresentado no apêndice A1. O sinal resultante pode ser expresso como  $V \cdot \sin(\omega t)$ , onde  $\omega$  e  $V$  são respectivamente a frequência e a amplitude da aceleração a impor à mesa.

4.2.4 Sensor de posicionamento central (CTV-P) - uma tensão  $V_o$  deve ser somado ao sinal sinusoidal para manter a vibração em torno de um ponto central do curso, provendo margem de movimentação simétrica, nos 2 sentidos. A amostragem da posição é efetuada por um sensor de proximidade indutivo (por correntes parasitas) Die Technik, instalado junto a uma fresagem em cunha na barra suporte do cursor do encoder. Este sensor é alimentado por  $+12V/GND$ , e fornece um sinal DC com 1V de variação, para o curso da mesa, com pedestal de tensão dependente da montagem. Durante o funcionamento vibratório, este sinal estará superimposto do sinal sinusoidal da vibração, que deve ser retirado. A alimentação do sensor é

fornecida através de uma proteção formada por Q1 e Q2, no esquema do Anexo 2.

4.2.5 Controle de ponto central (CTV-C) - O *proximeter* fornece uma tensão DC de sinal negativo, proporcional à altura  $h$  da mesa. Este sinal passa por um compensador de avanço de fase, e é somado ao nível de altura desejada  $h_0$ , ajustado no trimpot P3. O erro de posição  $Jx^m$  é alimentado na entrada Vo do amplificador de potência e transformado em aceleração de correção da mesa.

O erro de posição também é filtrado por R77/C14, fornecendo um valor de regime que polariza o transistor Q9, resultando no sinal  $W_0$ , proporcional ao peso da mesa, lido pelo canal ACH6 do microcontrolador.

4.2.6 Amplificador DC de Potência (CTV-A) - A transmissão de um acionamento sinusoidal a 2 *voice-coils* de 400 W cada em frequências desde DC até cerca de 1 kHz exige adequação perfeita às características das bobinas. As bobinas WPU para 400 W apresentam uma resistência ôhmica de cerca de 6,6  $\Omega$ . A maior demanda de potência ocorre nas baixas frequências, e para DC, a tensão necessária para impor a potência de 400 W é:

$$V = \sqrt{P \cdot R} \cong 50 \text{ V} \quad (I \cong 7,8 \text{ A})$$

À medida que a frequência sobe e as bobinas se movimentam, forças contra-eletromotrizes são geradas pelas bobinas que diminuem a potência máxima alcançada pela tensão de excitação, entretanto também cai a demanda de potência para uma dada aceleração.

O amplificador do esquema CTV-A do Anexo 2 (F1 2/5) tem 2 canais ligados em ponte. Como a potência é distribuída entre os 2 canais, no ponto máximo cada canal deve assumir 400 W. Cada canal atua em *push-pull*, com um conjunto de transistores responsáveis pelo semi-ciclo positivo e outro pelo negativo, reduzindo a potência por conjunto a 200 W. Os conjuntos são compostos de 2 transistores MJ15024 e MJ15025 em paralelo, com resistores de emissor de 0,33  $\Omega$  para compensação das diferenças de  $V_{BE}$ . A tensão sobre estes



resistores é monitorada para limitação da corrente em cerca de 7 A e proteção dos transistores de potência. Cada transistor opera, desta forma, com um máximo de 100 W, dentro de suas capacidades (250 V - 16 A - 250 W). Cada bloco de potência tem um limitador de corrente formado por um transistor polarizado pela tensão sobre o *shunt* de 0,33  $\Omega$ , que corta os transistores principais.

Um dos aspectos críticos do amplificador CTV-A é a necessidade de trabalhar com duas tensões de alimentação. As tensões de 50 V são necessárias para impor potência às bobinas (ligadas em série para garantir mesma corrente instantânea), mas dificulta o uso de amplificadores operacionais para o processamento dos sinais. Este tratamento é feito por circuitos alimentados por fontes simétricas de +12/-12 V, e cuidados especiais foram tomados na interligação entre os módulos.

Cada par de potência é acionado por um transistor de polaridade complementar, com o emissor ligado à alimentação, o que permite levar os pares de potência até a saturação, mesmo em tensões próximas à de alimentação, quando um resistor de polarização não pode ser bem dimensionado. Outra vantagem é a de que a polarização do grupo de potência é feita drenando-se corrente em direção a GND através de um transistor em emissor comum, cuja base fica isolada da tensão de alimentação de potência. Estes transistores (Q17, Q18, Q27, Q28) são o interface entre os módulos de potência (50 V) e o de processamento (12 V).

Os módulos de potência são montados fisicamente em placas próprias CTV-A2 (os transistores de potência diretamente nos dissipadores), para evitar excesso de fiação para a placa de sinais (cada módulo é ligado por 3 fios). Os dissipadores são de alumínio fundido, com resistência térmica  $R_{th} = 0,5$  °C/W e grande capacidade térmica para a absorção de surtos de potência.

Cada canal usa uma porta de AMPOP TL074 (U1A e U1D) para realimentar a tensão de saída de potência, e eliminar o *cross-over*. A saída dos amplificadores alimenta o centro de dois diodos polarizados (D19,

D14, D23, D24), que compensam as tensões  $V_{BE}$  dos transistores de interface, e polarizam as suas bases. Para evitar um possível excesso das tensões  $V_D$  sobre as  $V_{BE}$ , ocasionando a condução simultânea dos 2 módulos de um canal (em curto-circuito), os transistores de interface têm um trimpot de  $100\ \Omega$  entre os emissores, com o centro em GND. Esta montagem permite regular o equilíbrio dos módulos positivo e negativo com relação a diferenças de ganho entre os transistores de interface.

A corrente nas bobinas é amostrada por um resistor *shunt* de  $0,1\ \Omega$  em série entre as mesmas, cujas tensões nas extremidades são passadas por uma unidade de grampeamento de tensão de segurança feita com resistores e diodos 1N4004, e a tensão diferencial avaliada por um operacional com ganho unitário (U1C) e realimentada sobre o operacional de entrada (U1A), que soma os sinais de entrada ( $V_D$  e  $V_{sin}$ ) e os compara com o sinal de corrente no *shunt*, dando ao conjunto CTV-A uma característica de amplificador de transcondutância com fator de  $1\ A/V$ . Desta forma, a tensão do sinal de entrada se transforma em corrente nas bobinas, que por sua vez se transforma em força na mesa de massa constante, que a transforma em aceleração. A correspondência tensão de entrada-aceleração da mesa torna mais simples a programação do estímulo da mesa para ciclos de calibração.

O canal 2 do amplificador em ponte amostra a tensão de saída do canal 1 e a inverte, simplesmente.

A placa CTV-A ainda possui seu próprio regulador simétrico para  $+12/-12\ V$ . Os módulos de potência são alimentados por saídas exclusivas da fonte de potência, cada uma com fusível de  $4\ A$ .

**4.2.7 Fontes de alimentação (CTV-F)** - O esquema da Fl 1/5 do Anexo 2 mostra as fontes, cujo elemento primário é um transformador de  $890\ VA$ , com entradas para  $127\ V$  ou  $220\ V$ , e dois enrolamentos de saída, de potência e de sinal. Ambos os enrolamentos possuem derivação central para referência e alimentam pontes retificadoras para a produção de tensões simétricas.



A fonte de potência (50 V) possui capacitores de filtragem de 15.000  $\mu\text{F}$  com resistores em série, para limitar a corrente de carga, protegendo os diodos da ponte (SKW 21/02). O relé K1 atua após a carga, curto-circuitando os resistores, para que não introduzam mais regulação na tensão de saída. Cada tensão é dividida em dois canais com proteção por fusíveis de 4 A cada, que alimentam os módulos CTV-A2.

A fonte de alimentação para sinais possui uma ponte retificadora e filtragem por capacitores de 1000  $\mu\text{F}$  e fusíveis de 2 A, com saída de +21 V, a ser regulada individualmente em cada placa consumidora.

#### Condicionamento dos sinais medidos

Além do sinal DC de peso, subproduto do controlador de posição central da mesa, o sistema CTV adquire a saída do acelerômetro em calibração, a aceleração de referência da vibração, e a temperatura ambiente do ensaio.

A aceleração de referência, usada ao invés de um outro acelerômetro, é calculada a partir das grandezas fundamentais de tempo e espaço. O tempo neste caso é o período de uma oscilação, e que não é medido, mas sim conhecido por ser sintetizado pelo *driver* PWMSIN, para excitação da mesa, uma vez que o sistema excitado pode apresentar defasagem, mas não corrimento de frequência em relação à excitação. A precisão deste período é por conseguinte a do cristal oscilador, ou seja, cerca de 0,05%. O espaço é a distância percorrida em um período dividido por 2, fornecendo a amplitude pico-a-pico da sinusóide de deslocamento. A partir destes valores o programa determina a aceleração de pico e RMS da mesa, usada para aferir o acelerômetro em teste.

4.2.8 Condicionador para Acelerômetro em teste (CTV-I) - O esquema da F1 3/5 do Anexo 2 mostra o circuito de condicionamento. O conector CNP, no painel de operação, possui um pino de alimentação

de +10 V, produzido por um regulador 7810 que é por sua vez alimentado por um limitador de sobrecorrente de segurança.

Quatro tipos de condicionamento podem ser selecionados pelos sinais TP0/TP1 do conector CN11. O sinal TP0 seleciona o amplificador de cargas (U1B), independente do valor de TP1, pelo relé K<sub>1</sub>. Quando o amplificador de cargas não está selecionado, sua entrada é curto-circuitada à referência, para anular a saída.

Com TP0=0, TP1 não acionado alimenta U1D via relé K<sub>2</sub>. O shunt de 250  $\Omega$  garante a tensão de 10 V para fundo-de-escala de 20 mA, recebendo qualquer destes padrões industriais (0-10 V / 0-20 mA). Padrões deslocados (1-5 V / 4-20 mA) podem ser tratados por programa. O amplificador U1D, com ganho unitário, transmite o sinal ao seletor de ganho.

Com TP0=0 e TP1=1, o relé K<sub>2</sub> encaminha a entrada para o condicionador potenciométrico em U1C. Note-se que quando não selecionado K<sub>2</sub>, a entrada de U1C é ligada a GND.

As saídas dos condicionadores são somadas sobre os resistores R<sub>9</sub>, R<sub>7</sub>, R<sub>10</sub> e R<sub>15</sub>, que dividem o valor por 4. O amplificador U1A recebe o sinal e o amplifica com 4 faixas de ganho programáveis pela chave analógica U2 e os sinais (GN0, GN1).

O sinal já escalado é desacoplado da componente contínua pelo capacitor C<sub>18</sub> (que deve ser carregado na inicialização, pela chave U7C) e processado pelo conversor AD536 (U3), fornecendo uma tensão V<sub>RMS</sub> contínua, proporcional ao valor RMS da sinusóide alimentada, que é enviado a ACH<sub>4</sub> pelo pino VA do conector CN11.

4.2.9 Condicionador para encoder de deslocamento (CTV-E) - O encoder LS-623 da Diadur possui uma régua de cristal, com marcações a espaços de 20  $\mu$ m. Dois sensores ópticos com colimadores separados por 5  $\mu$ m pulsam com a passagem das marcações, gerando 2 formas de onda quadradas, defasadas de 90°, como pode ser visto nas anotações da Pag.4/5 do anexo 2. Os sinais dos 2 sensores são enviados por

tensões diferenciais, cada um por um par de condutores do conector CN13.

A alimentação (+5V) é enviada por um regulador 7805, protegido por um par complementar de transistores contra sobrecorrentes. Os sinais diferenciais são aplicados sobre os resistores R53 e R54 e à entrada de amplificadores TL074 (U10C/D) usados como comparadores, e em laço aberto. As 2 ondas defasadas são intermoduladas por uma porta OU-exclusivo (U11A), gerando uma forma de onda com pulsos de 5  $\mu$ m de largura. Com as portas OU-exclusivo remanescentes do 4070, faz-se um detector bidirecional de borda de pulso, que gera pulsos positivos de 500 ns de largura a cada transição (5  $\mu$ m). Estes pulsos DELTAH são enviados ao pino HSI1 do conector CN1, que é configurado como TCLK2 no 8098, contador de pulsos durante um período da sinusóide.

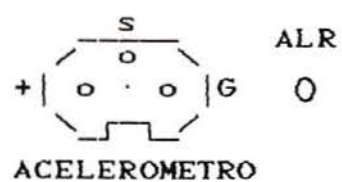
4.2.10 Amostragem de temperatura da mesa (CTV-T) - Um NTC (R70) é montado em um braço de ponte, formada com o resistor R71, e sua saída dividida pelo conjunto R72/R73, e conduzida ao pino ACH5 de conversão do conector CN1. A saída é grampeada em 5 V, para proteção do 8098.

### 4.3 Painel de controle e operação do ensaio

O painel de operação esquematizado na Fig 4.6 apresenta uma chave geral de alimentação (LIGA-DESL), LEDs indicadores de alimentação e de alerta. Também estão ali localizados porta-fusível, um teclado de 12 teclas e um display LCD de 16 caracteres x 2 linhas para operação. O conector superior da esquerda destina-se à conexão do acelerômetro a ensaiar, através de um dos cabos disponíveis. Os conectores trapezoidais abaixo são o da impressora, o de porta serial para interligação com microcomputador na recomendação RS-232, e um conector não utilizado.

Ao lado dos conectores trapezoidais, uma tabela informa as diversas formas de conexão de acelerômetros, e as seleções de tipo e ganho.



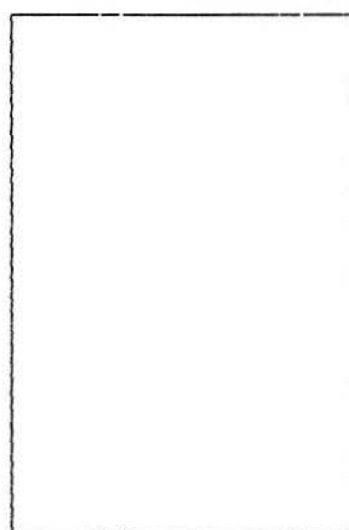


ALR

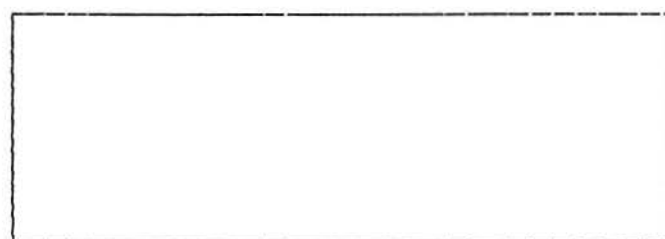
0

DISPLAY LCD

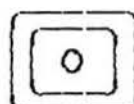
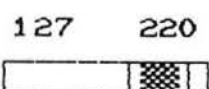
2 LINHAS x 16 CARACTERES



7	8	9
4	5	6
1	2	3
#	0	*



FUS



CTV CALIBRADOR PARA  
TRANSDUTORES DE VIBRAÇÃO

ENERGIA

0 +50V

0 -50V

0 +12V

0 -12V

LIGA

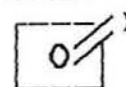


Fig 4.6 - Diagrama do Painel de Controle



4.3.1 Funções Disponíveis e Operação - Para um bom funcionamento, é importante que o conjunto seja colocado sobre uma mesa ou bancada sólida e pesada, bem nivelada. O chicote de alimentação deve ser ligado a uma tomada monofásica de tensão 127V/220V (ver chave de seleção na lateral), com capacidade para cerca de 1 kW. Os seguintes passos devem ser seguidos para a obtenção de um ensaio de calibração para um acelerômetro:

- a) Montagem do acelerômetro a ensaiar
- b) Alimentação do Conjunto de Teste
- c) Configuração de parâmetros
- d) Acionamento da sequência de ensaio
- e) Saída dos resultados

4.3.2 Montagem do acelerômetro - A primeira providência de um ensaio é, com o conjunto ainda desligado, instalar o acelerômetro a ensaiar no local apropriado sobre a mesa. Os acelerômetros vêm com um furo rosqueado de diâmetro variável para sua fixação. Na gaveta de acessórios existe uma coleção de parafusos de conversão, com uma rosca diferente em cada metade, que permite adaptar da rosca padrão da mesa para a do acelerômetro que vai ser testado.

Instala-se após o acelerômetro a ensaiar, atarrachado com a mão, e finalmente apertado com a ferramenta que sua construção indicar apropriada. Uma gota de óleo pode ser usada para ampliar o contato entre as superfícies da mesa-flange do adaptador-acelerômetro [B&K/79].

Feita a conexão mecânica, deve-se proceder à conexão elétrica. É necessário ter à mão o esquema de excitação do acelerômetro a ensaiar, porque há vários métodos possíveis, a ajustar pelo teclado (Tensão / Corrente / Potenciométrico / Elementar). Isso depende da constituição do acelerômetro como dispositivo de uso. Ele pode ter apenas uma cápsula piezoelétrica montada no invólucro, com 2 terminais para acesso (excitação elementar), mas também pode incluir um pré-amplificador e condicionador do sinal, cuja variável de saída seja tensão ou corrente, e no caso de tensão, pode requerer uma fonte de tensão via um terceiro condutor (3 fios). Além disso, é

necessário escolher o conector apropriado para a ligação, dentre os chicotes acessórios. Para simplificar a parte do conector, existem alguns chicotes especiais, montados pino a pino, que podem ser adaptados a qualquer tipo de conector, entretanto exigem atenção especial aos contatos, para que não se soltem durante o ensaio devido à vibração.

**4.3.3 Alimentação do Equipamento** - Com a mesa livre, o equipamento é alimentado pela atuação da chave "LIGA".

Ao ligar, as fontes são ativadas, e os LEDs verdes **ENERGIA** acendem todos. O LED ALR pisca durante um tempo em que o display mostra a mensagem "AUTO-TESTE", e apaga a seguir. A mesa ergue-se até o ponto central, e não deve mais ser tocada até ser desativada. O peso do acelerômetro montado é avaliado e o display exibe as opções 1-PA 2-TS 3-EN 4-RE, para início de teste, configuração de parâmetros, condução do ensaio ou saída de resultados.

**4.3.4 Configuração de parâmetros** - esta opção pode ser selecionada pela tecla [ 1 ] do painel. Configura-se a frequência e amplitude máximas que podem ser utilizadas no ensaio, a identificação do operador, e a identificação do ensaio, a saber:

- a) Data e Número de série
- b) Nome do requisitante
- c) Tipo e fabricante do transdutor
- d) Modelo e Número de série do transdutor

**4.3.5 Menu de testes** - selecionado pela tecla [ 2 ], permite em um dos módulos mostrar continuamente a temperatura e o peso da mesa, sem excitação sinusoidal, e em outro módulo, mostra a temperatura, a frequência, a aceleração e o valor medido pelo acelerômetro, permitindo aumentar ou diminuir a frequência de excitação pelas teclas [ 1 - 3 ], e a amplitude da vibração pelas teclas [ 4 - 6 ].

**4.3.6 Acionamento do ensaio** - Selecionado pela tecla [ 3 ]. Permite as modalidades Ciclo Total (ensaios estático, dinâmico e saída dos resultados), Ensaio total (estático e dinâmico), ensaio

individual de resposta em amplitude, ensaio individual de resposta em frequência.

A partir da seleção de ensaio, o LED ALERTA acende e o display mostra a mensagem "ENSAIO ATIVO- [#] P/CANCELAR". Para o ciclo total, o ensaio de resposta em amplitude é realizado em primeiro lugar.

Para o ensaio de resposta em amplitude, uma frequência de cerca de 41 Hz é aplicada em 5 ou 10 degraus de 0,5 G mais 10 degraus de 1 G, de 0 a 100 G, em 4 ciclos. Cada degrau tem a duração de 1 s, com um retardo inicial de 600 ms para expiração de transitório, seguido de 3 amostragens da tensão efetiva. Se o desvio padrão das 3 medidas é superior a 5%, o período é repetido por mais até 2 vezes, senão marcado como instável. Todo o ciclo leva cerca de 1 min. O display apresenta o acompanhamento do andamento, com o ciclo (1 a 4) e a aceleração aplicada.

Para o ensaio de resposta em frequência, uma aceleração fixa de 0,5 G é aplicada em degraus de 1 oitava de frequência, a partir de 5,1 Hz até 40,7 Hz (5 degraus); então (mantendo 40,7 Hz) a amplitude é elevada para 100 G, e mais 5 degraus aplicados, até 1302,1 Hz. Cada degrau tem um retardo de estabilização de 2 s (5 s para os primeiros degraus em 0,5 G e 100 G), seguido de 3 medições como no procedimento do ensaio em amplitude. O display apresenta a frequência sendo aplicada. O ciclo completo dura cerca de 30 s.

Durante os ensaios, 2 tabelas com as coordenadas de cada ponto (aceleração/frequência de referência e tensão RMS lida) são armazenadas para o processamento posterior. Ao final do ensaio, o LED ALERTA desliga e o display volta a exibir o menu inicial.

**4.3.7 Saída dos resultados** - A saída é feita de modo simultâneo pelas portas paralela e serial, e em idêntico teor. Se se quer um resultado impresso, ativa-se um impressora conectada à porta paralela; se se quer registrar os dados via um microcomputador, conecta-se a porta serial a este, e ativa-se um comando de gravação



(p.exemplo "COPY COM1: ENSAIO.DAT", para o DOS), após o que é comandada a saída dos resultados.

A saída de resultados é comandada pela tecla [ 4 ] do menu inicial, que apresenta as opções geral, só curva estática, só curva dinâmica ou só a tabulação dos resultados.

Para a gravação dos ensaios com vistas a processamento posterior muitas vezes só se quer as tabelas adquiridas, o que pode ser conseguido pela opção 4. Se se quer isolar o gráfico para inclusão em outro relatório, pode-se usar as opções 2 e 3 para gerar arquivos com os dados de graficação da resposta em amplitude e da resposta em frequência.

Durante a saída de resultados, acende o LED ALERTA. Após o término ou cancelamento (tecla [ # ]) da saída de resultados, o display volta a mostrar o menu inicial.

#### 4.4 Programa de controle

O programa de controle tem as atividades organizadas por uma árvore de menus como a que segue:

- 1- Parâmetros
  - 11- Seleção Tipo Condicionamento
  - 12- Seleção Valor Máximo - Amplitude / frequência
  - 13- Ident.Operador
  - 14- Ident.Ensaio
    - 141- Data e Número
    - 142- Requisitante
    - 143- Transdutor- fabricante e tipo
    - 144- Transdutor- modelo e Número de série
- 2- Testes
  - 21- Exibe Temperatura e Peso
  - 22- Excita amplitude/frequência e exibe medidas
- 3- Ensaios
  - 31- Faz ensaio estático (só adquire)
  - 32- Faz ensaio dinâmico (só adquire)
  - 33- Ensaio duplo (adquire)
  - 34- Ciclo total (ensaio duplo e saída de resultados)
- 4- Saídas
  - 41- Geral impressa
  - 42- Só curva ensaio estático
  - 43- Só curva ensaio dinâmico
  - 44- Só tabulação de dados adquiridos



Na execução destas tarefas, alguns procedimentos modulares são desenvolvidos isoladamente, como os descritos a seguir.

4.4.1 Inicialização - A inicialização é efetuada ao se alimentar o conjunto CTV, e consta de uma temporização de prazo de estabilização, para carga de capacitores, um teste da memória, pulsamento de "reset" em alguns circuitos, medição do peso da mesa, pela tensão de estabilização do controle de posição central (e alarme, se excessivo). Uma excitação piloto de 0,5 G em 40 Hz é experimentada, para estipular máximos reduzidos para o ensaio a seguir. Finalmente, o menu geral é colocado no display.

4.4.2 Driver de acionamento sinusoidal - a excitação sinusoidal, gerada via PWM, é apresentada no apêndice A.1. Neste programa, ela é no entanto adicionada da leitura síncrona do contador TCLK2 a cada ciclo. TCLK2 é lido para um registro circular de 10 posições, e reinicializado em zero, para contar o deslocamento no próximo ciclo. Ao terminar o prazo de coleta em um patamar da estimulação, o registro circular é avaliado pela média das suas dez leituras, que representam os 10 últimos ciclos da mesa, produzindo um valor com uma casa decimal a mais do que as leituras individuais, isto é, com precisão de 0,5  $\mu\text{m}$ .

O driver sinusoidal é ativado apenas quando se faz a aquisição do ensaio, pois consome cerca de 50% do tempo do processador. Ao terminar a sequência de um ensaio, o driver é desativado, para liberar o processador para os cálculos sobre a amostragem efetuada.

4.4.3 Estimulação do Ensaio Estático - Uma tabela é montada com a série de níveis de estimulação a serem utilizados. A frequência é estabelecida (40,7 Hz), e um algoritmo de geração da varredura dos índices da tabela entre seus limites de uso e em 2 ciclos carga-descarga é iniciado. A cada valor de aceleração escrito no interface, um tempo de estabilização e aquisição é aguardado, enquanto o driver sinusoidal adquire circularmente as contagens de amplitude mecânica para o registro. Após o tempo de espera, o valor

médio da amplitude é calculado, e com ele a aceleração efetiva observada na mesa, e a saída do condicionador do acelerômetro adquirida como par coordenado. O algoritmo procede ao próximo índice da varredura, e a tabela de amostras é preenchida.

4.4.4 Estimulação do Ensaio Dinâmico - Uma tabela dupla de índices para a geração de frequências pelo *driver* PWMSIN é montada. Uma amplitude inicial de 0,5 G é escrita no D/A, e a tabela de índices percorrida até a frequência de 40,7 Hz, adquirindo as acelerações e saída do acelerômetro, de forma similar ao ensaio estático. Na frequência de 40,7 Hz, a aceleração é aumentada para 100 G (para que a amplitude da vibração continue mensurável nas altas frequências), e o restante dos índices percorridos nesta condição. O resultado é uma tabela com no mínimo 7 pontos de frequências em progressão geométrica e saídas dos acelerômetro relativas a estas frequências de estimulação.

4.4.5 Processamento das amostras - o processamento das amostras é feito após a desativação do *driver* de acionamento, e segue os procedimentos mostrados no apêndice A.2, com a determinação de índices característicos, normalizações, aproximação polinomial, e processamento de escala automática.

4.4.6 Determinação de escala automática para a graficação - este procedimento não é coberto no apêndice A.2. O quadro gráfico a utilizar na "tela" é definido por sua coordenada de canto (*xgspan*, *ygspan*), e sua posição pelo canto inferior esquerdo (*xgo*, *ygo*).

O primeiro passo percorre as amostras e determina a faixa de abrangência da amostragem (*xmin*, *xmax*) / (*ymin*, *ymax*). No caso do ensaio estático, há 2 valores de *xmax*, um para cada ciclo de varredura.

O segundo passo é processar as subdivisões a marcar nos eixos. Um número mínimo de subdivisões é arbitrado entre 2 e 5, conforme a variável abranja valores negativos, zero e valores positivos. O valor máximo da subdivisão é avaliado pela abrangência da variável e

o número mínimo de subdivisões a usar. Este valor é representado em característica e mantissa, a qual é arredondada para um dos valores de 1, 2 ou 5, e re-escalado para a magnitude original pela aplicação da característica, fornecendo um valor absoluto de subdivisão ( $q_{sub}$ ). A seguir o número de subdivisões ( $n_d$ ) é calculado, tal que contenha toda a abrangência da variável amostrada, ajustando os pontos inicial e final do eixo, em números inteiros de subdivisões ( $q_{qmin}$ ,  $q_{qmax}$ ). O processo é aplicado aos dois eixos, com as determinação dos limites de graficação de cada um, com seu módulo específico de subdivisão.

O terceiro passo processa as escalas de graficação, bem como ajusta os pontos iniciais da plotagem. O valor da subdivisão foi calculado em mensurons (unidade usada na aquisição, seja mV, pF, %, mA, etc). O fator de escala gráfico (pixel/mensuron) é calculado como a relação entre a faixa de graficação delimitada ( $y_{gspn}$ ) e a faixa da variável amostrada ( $y_{qmax} - y_{qmin}$ ). Além disso, a escala Y tem de ser ajustada para que as marcações das subdivisões recaiam em linhas inteiras da impressora, de tal forma que os valores sejam impressos em modo não gráfico. Finalmente, os pontos iniciais de graficação são também ajustados para centralizar o texto impresso com as marcações graficadas.

4.4.7 Geração gráfica para impressora - Todas as linhas a serem traçadas são armazenadas em uma matriz de vetores. As linhas são percorridas, onde cada linha tem toda a faixa em x, e uma determinada faixa em y de abrangência. Para cada linha de impressora, toda a matriz de vetores é percorrida, determinando para cada vetor se este tem intersecção com a faixa a graficar. Se tem, os pixels correnspondentes são inseridos no *buffer* de linha gráfica. Ao completar a varredura dos vetores para uma linha, é montado o cabeçalho, com código gráfico e tamanho do *buffer*, e impressos a margem esquerda em caracteres, o *buffer* gráfico, e a margem direita, também em caracteres.

4.4.8 Entradas pelo teclado telefônico - Várias convenções devem ser utilizadas para o bom uso do teclado de 12 teclas. Na seleção

de menus e nas entradas numéricas, a tecla [ \* ] confirma a entrada, e a tecla [ # ] anula o último passo. Nas entradas alfanuméricas, o cursor informa um de 3 modos - alfa, número ou sinais - em que o programa interpreta as entradas. No modo alfa, as teclas inferiores (#, 0, \*) são usadas como prefixos, e as superiores valem cada uma por 3 caracteres, conforme a tabela abaixo, que também é fixa no painel. Assim, todos os caracteres mais o espaço podem ser digitados, para a identificação do ensaio. No modo numérico, a sequência "##" vale pelo ponto decimal, as outras teclas pelos algarismos correspondentes. No modo sinais, são produzidos os sinais da tabela, sendo que os sinais próprios das teclas de prefixo são produzidos pelas sequências ("\*" = "\*+", "#" = "\*-").

A mudança entre modos é comandada por "\*#", o cancelamento do caractere anterior por "##", e o final da entrada por "\*\*\*".

GPY	HQZ	IR_
DMV	ENW	FOX
AJS	BKT	CLU
F1	F2	F3

ALFA

7	8	9
4	5	6
1	2	3
#	0	*

NÚMERO

(	:	)
?	,	!
-	/	+
#	=	*

SINAIS

Fig 4.7 - Tabelas de Modos do teclado

#### 4.5 Precisão da Referência

O processo básico de obtenção da aceleração de referência envolve a frequência produzida, a excursão medida, e a computação da aceleração através da fórmula básica

$$A = H \cdot \omega^2 \quad \text{onde} \quad A \text{ [m/s}^2\text{]} = H \text{ [m]} \cdot \omega^2 \text{ [rad/s]}^2$$

$$\text{ou:} \quad A_a \cdot K_{m/a} = H_p \cdot K_{m/p} \cdot 4\pi^2 f^2$$

cujas constantes de conversão de unidade podem ser reunidas em um único valor, resultando na fórmula operacional

$$A_a = K_A \cdot H_p \cdot f^2 \quad (4.1)$$



Cada elemento e cada operação introduzem um erro proporcional conhecido, e a medição da altura  $H_P$  apresenta um erro fixo adicional de  $\pm 0,5$  resultante do ruído de quantização. As fontes dos erros podem ser calculadas por unidade:

- a) Deslocamento (pulsos):  $e_H = (0,00015 H_P + 0,5) / H_P$   
 b) Freqüência (cristal):  $e_f = 0,0005$   
 c) Computacional (24 bits):  $e_K = 0,000000119$

Agora, como a fórmula básica é multiplicativa, os erros por unidade podem ser propagados pela multiplicação, assim

$$e_A = (1 + e_H) \cdot (1 + e_f)^2 \cdot (1 + e_K)^4 \quad (4.2)$$

será o erro total da aceleração de referência. Notar o erro computacional envolvido em 2 multiplicações, um quadrado e uma constante (convertida p/binário).

*Decimação - Se a posição central da mesa é variada linearmente por uma onda triangular superposta à referência de posição, com amplitude de  $\pm 20 \mu\text{m}$  e baixa freqüência, e uma sucessão de contagens de pulsos de deslocamento a cada meio-ciclo é tomada, o valor médio destas contagens filtra o ruído de quantização e reduz o erro fixo a um valor de  $\pm 0,05$  pulso (p/séries de 10 leituras). Usando este procedimento de decimação, a precisão é como mostrada na tabela IV.*

**TABELA IV**  
*Erro percentual em Função de Amplitude/Freqüência*  
*Calibrador para Transdutores de Vibração*  
*Com Decimação das Leituras*

Acel(G)	0,1	0,5	1,0	5,0	10,0	100,0
Freq(Hz)						
2,5	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
5,1	0,14	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
10,2	0,22	0,14	0,13	0,12	0,12	0,12
20,3	0,53	0,20	0,16	0,12	0,12	0,12
40,7	1,78	0,45	0,28	0,15	0,13	0,12
81,4	***	1,45	0,78	0,25	0,18	0,12
162,8	***	***	***	0,65	0,38	0,14
325,5	***	***	***	***	1,18	0,22
651,0	***	***	***	***	***	0,54
1302,1	***	***	***	***	***	1,82

Fonte: Eq. 4.2

\*\*\* (Valores maiores que 2%)

Em um caso típico sem decimação ( $f = 40,695 \text{ Hz}$ ;  $a = 1 \text{ G}$ ) temos que  $H = a/\omega^2$  resulta em  $149,98 \mu\text{m}$ , ou seja,  $H_p = 30$  pulsos, o que fornece  $e_H = 0,0168$ . Com a propagação chega-se a  $e_A = 1,0178$ , ou seja, uma precisão de 1,8%.

#### 4.6 Características Técnicas

##### Conjunto

<u>Dimensões</u>	60cm x 46cm x 30cm
<u>Peso</u>	60 kgf
<u>Alimentação</u>	Monofásica, 127/220V (+5%/-10%), 1kVA Fusíveis 5A (220V) / 8A (127V)

##### Mesa Vibratória

<u>Fixação de acelerômetro</u>	rosca M8. Pinos acessórios M8/M8, M8/M5, M8/M3
<u>Acionador</u>	conjunto magnético e voice-coil WPU (Selenium) 2 x 400W - 11,5 kGauss entreferro
<u>Massa máxima</u>	Acelerômetro em ensaio: 350g
<u>Curso máximo</u>	25mm (amplitude 12,5mm 0-pico)
<u>Amplitudes</u>	(350g/40,7Hz): 0,5-100G em passos de 0,5/5G
<u>Frequências</u>	5,1 / 10,2 / 20,3 / 40,7 / 81,4 / 162,8 / 325,5 / 651,0 / 1302,1 Hz - (8 oitavas)
<u>Excitação</u>	geração de sinal PWM por microcontrolador 8098, filtrado (Passa-Baixa Chebyshev 3dB) em 3800 Hz, amplificado em DC por transcondutância ( $V_i \rightarrow I_o$ )

##### Aquisição da Aceleração

1) <i>Encoder</i>	Amostragem do deslocamento por encoder Diadur c/resolução de $5\mu\text{m}$ (precisão 0,015 %FSO), processamento sobre base de tempos interna (cristal 12 MHz, precisão 0,05%) para obtenção da aceleração.
-------------------	---

##### Condicionamento dos Acelerômetros

<u>Conexão</u>	Acelerômetro em ensaio- cabo conectado ao conector CNP no painel de operação.
<u>Excitação</u>	Modalidade conforme selecionado pelo teclado no painel de operação: a) Tensão: 0-10 $V_{\text{pico}}$ (3/2 fios) / +10Vcc b) Corrente: 4-20 mA (2 fios) / +10Vcc c) Elementar: 0-10 V (Amplif.Cargas) d) Potenciométrica: 0-100 % / +10Vcc
<u>Condicionamento</u>	Eliminação da tensão de patamar DC, retificação RMS do sinal para aquisição por conversor A/D (10 bits).

## Controle de Altura Central da Mesa

<u>Leitura</u>	Proximeter Die Technik sobre cunha no eixo da mesa / Filtragem p/obtenção de valor DC
<u>Controle</u>	Comparação c/tensão de referência (regulagem) e geração de tensão patamar de peso ao amplificador DC e ao canal conversor A/D do microcontrolador (10 bits)

## Controlador do Equipamento

<u>Microcontrolador</u>	INTEL 8098 envólucro DIP, cristal 12 MHz, 32 KB EPROM, 8 KB RAM
<u>Display</u>	LCD Alfatronic, 2 linhas x 16 caracteres
<u>Teclado</u>	Modelo telefônico 12 teclas
<u>Porta Serial</u>	Saída do 8098 via condicionador ICL232 a conector trapezoidal DB-9
<u>Impressora</u>	Saída paralela padrão Centronics a conector DB-25, protocolo EPSON compatível.

## 5. DISCUSSÃO DA MONTAGEM E RESULTADOS

Neste desenvolvimento, alguns pontos que devem ser comentados são:

- a) Proteção do entreferro - durante longos períodos em que a montagem mecânica esteve interrompida, a exposição dos núcleos magnéticos ao ambiente da oficina causou a aquisição de uma quantidade de partículas metálicas pelo campo do entreferro, que hoje ficam roçando o *voice-coil*, e que não sabemos como retirar. Há que proteger, inclusive durante o funcionamento.
- b) Otimização do *encoder* - a técnica de usar um *encoder* baseado em régua de cristal supre as necessidades desta mesa, mas em um regime de produção, o fabricante seria contactado para que fornecesse peças avulsas, com as quais se montaria uma régua (talvez menor), e um cursor balanceado, robusto e com alto *slew rate*. A iluminação seria feita por um diodo LED de alta luminosidade, ao invés de lâmpada de filamento. O que se fez neste trabalho experimental foi adquirir a peça disponível mais parecida com o necessário, desmontá-la e adaptar ao tipo de trabalho esperado. É possível que esta montagem introduza vibrações laterais por falta de simetria, além do cursor talvez não resistir mecanicamente a uma vibração de 100 G (que nem tentaremos impor), e que a partir de certa frequência não consiga mais formar os pulsos, por usar circuitos eletronicamente lentos.
- c) Massa da mesa - por mais que se tenha tentado, a massa da mesa (adicionada da haste e cursor) ultrapassou os 150 g que haviam sido provisionados. Isso diminui a massa do acelerômetro que pode ser montado para receber toda a faixa de intensidades do equipamento. Usando intensidades menores (0-10 G), pode-se ter a certeza de cobrir bem toda a faixa de valores.



### 5.1 Operacionalização

A partir de uma primeira montagem operacional, o equipamento foi ativado dentro de limites mais curtos, para segurança.

a) Faixa de acelerações limitada - com o desconhecimento da robustez da montagem do cursor (e pela própria ficha técnica do mesmo), decidiu-se usar a mesa na faixa 0-10 G e não 0-100 G, evitando-se que algum dano possa ocorrer nos primeiros ensaios.

b) Faixa de frequências reduzida - Acompanhando a restrição na amplitude, as frequências foram percorridas em uma faixa de 1 a 20 Hz, em uma sucessão com razão  $\sqrt{2}/2$ , como mostrado:

1,27 | 1,80 | 2,54 | 3,60 | 5,09 | 7,19 | 10,17 | 14,39 | 20,35

Os valores são fracionários, pela técnica de divisão da frequência do cristal, entretanto são muito exatos.

c) Limitação de corrente no amplificador - foi colocada uma limitação de corrente de 5 A nos blocos de potência, a qual pode ser suportada de forma plena por algum tempo, durante situações de teste. Esse valor de pico limita a potência da excitação sinusoidal a cerca da metade da nominal.

### 5.2 Programa de Controle

O programa de controle final não está concluído. Entretanto, seu projeto, fluxograma e teste de módulos encontram-se todos resolvidos, como apresentamos a seguir.

a) Procedimento de ensaio - os procedimentos estão descritos na seção 4.3, e seus fluxogramas no Anexo a-4. Estes procedimentos são suficientes para o uso e manutenção do conjunto CTV, em todas as situações descritas, com ensaios isolados ou conjugados.

b) Excitação da mesa - o único programa executável na placa IEE98 é

o programa SIN.C (no Anexo a-4). Este permite excursionar pelas frequências tabeladas em 5.1, e percorrer a faixa de níveis de intensidade aplicada. Este programa utiliza o *driver* de geração sinusoidal PWM descrito no Apêndice 1. A próxima adição a este programa é a leitura concorrente dos pulsos e da saída do condicionador do acelerômetro, com sua apresentação simultânea no display, para verificação completa da instrumentação.

O programa PWMSIN.BAS, em BASIC, desenvolve as tabelas para a síntese de um determinado elenco de frequências sinusoidais via PWM, para ser usada em conjunto com o *driver* de excitação do programa SIN.C, calculando inclusive o filtro passa-baixa para a eliminação da frequência do chaveamento.

c) Processamento dos dados adquiridos - a sistemática exposta no Apêndice 2 foi modelada e testada, com dados simulados, e o processamento efetuado, até a plotagem em em display de computador. Os programas implementados encontram-se no Anexo a4.

O programa CALSTAT.BAS, escrito em BASIC, adquire os parâmetros para a simulação de um transdutor (inclusive defeitos), constrói uma tabela de 2 ciclos de calibração, e a seguir processa a tabela, exibindo a graficação e os índices tabulados, em monitor de vídeo.

O programa CALDINA.BAS, em BASIC, simula uma calibração dinâmica, com varredura da frequência da estimulação, gerando uma tabela de dados adquiridos, que depois é processada e exibida, com graficação e tabulação de índices, em monitor de vídeo.

d) Graficação em impressora - Para a produção dos gráficos na impressora, é necessário reordenar os elementos da graficação, em ordem do percurso de linhas. Isso é feito pela montagem de vetores de pontos e linhas a serem plotadas, que são percorridos repetidamente, para a montagem de cada linha gráfica que vai ser enviada à mesma. O programa EPSCAL.BAS, em BASIC, pode ser chamado por outro programa em BASICA, com os arranjos XI(), YI() contendo NI pontos, através do comando CHAIN "EPSCAL",10,ALL, e determina os

domínios das variáveis XY e YI, executando a plotagem de uma poligonal ponto-a-ponto dos pares ordenados (XY,YI) em uma impressora padrão EPSON.

O programa CALSTAT.C ainda em fase de conversão, executa o processamento em C dos ciclos de calibração estática, vetorizando.

### 5.3 Comparação direta com a gravidade local

A técnica descrita a seguir pode ser utilizada para a aferição de um valor absoluto das referências utilizadas, ao longo de toda a faixa de frequências, e foi exposta verbalmente por Rodolfo Yá kubsohn, durante discussões de padrões de calibração.

*Esta técnica permite determinar o nível exato de excitação vibratória cuja aceleração de pico se iguale à aceleração da gravidade local. Um acelerômetro piezoelétrico é montado sobre o equipamento vibratório. Sobre sua tampa superior é colado um tubinho de papelão na vertical, dentro do qual é colocada uma esfera de rolamento, que repousa sobre a carcaça do acelerômetro. A saída do acelerômetro é monitorada através de um osciloscópio.*

*O equipamento vibratório é energizado progressivamente. No osciloscópio, pode-se acompanhar o sinal sinusoidal da aceleração adquirida. A esfera repousa sobre a tampa do acelerômetro, acelerada contra esta pela aceleração da gravidade local. Enquanto os valores de aceleração impressos à superfície de repouso não atingem a gravidade, a esfera mantém-se apoiada sobre esta superfície. No momento em que a esfera for acelerada para cima a uma aceleração ligeiramente superior à da gravidade, quando a mesa inverte o sentido do movimento a esfera se destaca da superfície, contando apenas com a aceleração da gravidade local para inverter o seu movimento. Em algum ponto mais abaixo, a mesa irá desacelerar novamente, e a esfera colide com a superfície, juntando-se novamente a esta. Esta colisão gera uma espícula sobre o sinal transduzido pelo acelerômetro, o que identifica a ocorrência desta situação. A comparação entre o nível acusado pela instrumentação ao se atingir a produção desta espícula e o valor da gravidade local é um importante ponto de referência para a homologação do calibrador.*

#### 5.4 Medições do Funcionamento da Mesa Vibratória

Após a colocação da mesa em funcionamento, os sinais de excitação da mesma (saída p/amplificador), posição (saída do *proximeter*), e aceleração (saída do acelerômetro) foram adquiridos, pela transcrição por transparência, a partir da tela de um osciloscópio, fornecendo as formas de onda abaixo:

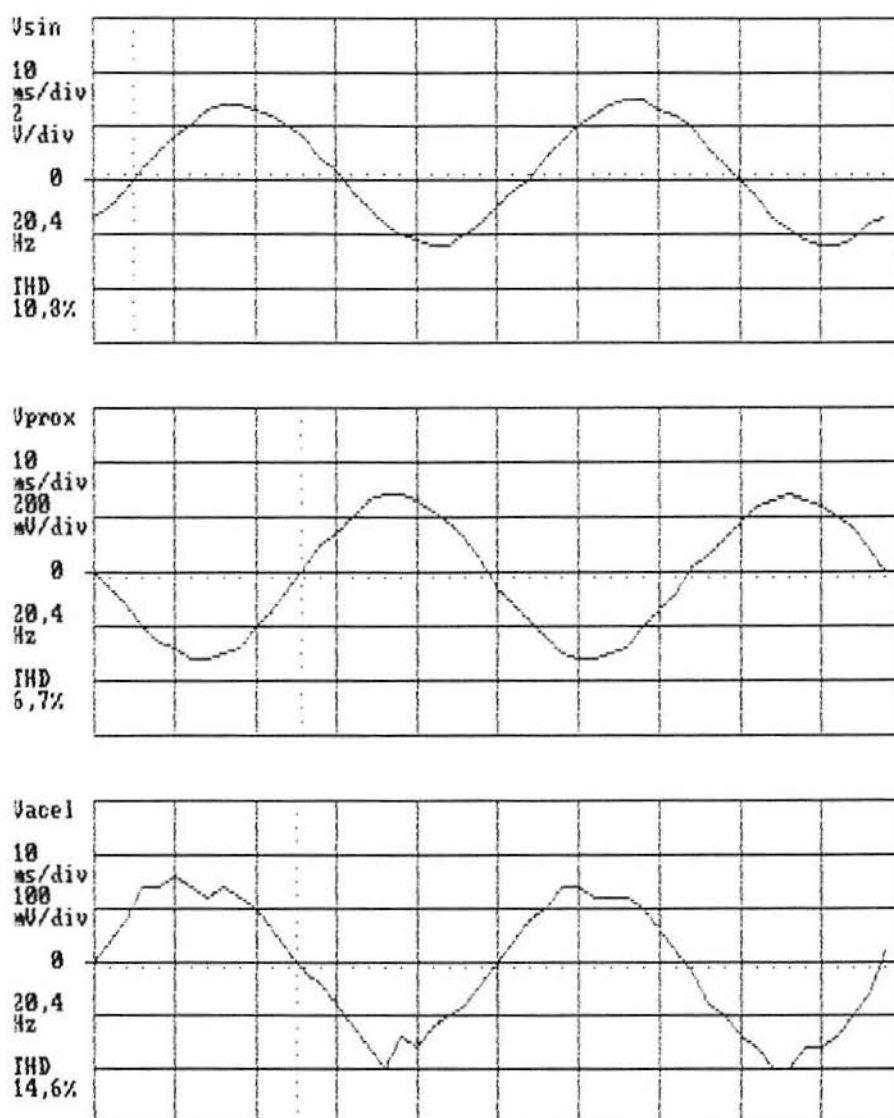


Fig 5.1, 5.2 e 5.3 - Excitação, posição e saída-transd.

As seguintes considerações devem ser feitas sobre as formas de onda das figuras:

- a) Teor Harmônico - apesar de se introduzir uma distorção



significativa pelo método de registro das formas de onda, a Distorção Harmônica calculada para a posição ( $V_{prox}$ ), ficou em apenas 6,7%, o que homologa a técnica de contagem de pulsos durante um semi-ciclo para a medição de  $H_{pico}$ .

b) Fase - a posição ( $V_{prox}$ ) se atrasa cerca de  $135^\circ$  em relação à excitação ( $V_{sin}$ ), como se nota pela marcação do primeiro cruzamento por zero, e isto deve ser creditado aos blocos de conversão magneto-mecânica da mesa. É importante observar que a contagem defasada dos pulsos do semi-ciclo não altera a amplitude inferida. Já a saída do acelerômetro está  $180^\circ$  defasada da posição.

c) Saída - a aceleração apresenta deformações côncavas nos pontos de inversão de velocidade. Isto se deve à acomodação de acoplamentos mecânicos não completamente rígidos (pequenas folgas) na montagem da parte móvel da mesa. Esta onda pode ficar completamente desfigurada se apenas um dos pés da mesa for afrouxado, retirando a firmeza do gabinete, ou se este repousa sobre uma superfície ou mesa com alguma elasticidade. Por isso, recomenda-se a instalação sobre bancada de concreto, e o nivelamento perfeito dos apoios da mesa, além da verticalidade do êmbolo.

Por outro lado, a resposta mecânica da mesa a diversas frequências foi levantada resultando na tabela seguinte, onde se pode notar a existência de uma ressonância entre 10 e 20 Hz.

TABELA V

*Resposta da Mesa Vibratória à Excitação  
em diversas frequências*

$f$ (Hz)	$V_{sin}$ (V)	$V_{prox}$ (mV)
3,60	0,7	680
7,19	1,0	820
10,17	1,15	840
20,35	1,20	300

FONTE: medições em 15/01/97

## 6. CONCLUSÕES

Mesmo não estando operacional em toda a faixa proposta, o acompanhamento da montagem do equipamento prova ser ele viável a um custo inferior a US\$ 3000, o que torna o próprio protótipo artesanal um instrumento de interesse industrial, dentro da proposição inicial.

A gama de serviços incorporados ao calibrador o torna versátil, a saber:

- a) Condicionamento para 4 tipos saída do acelerômetro
- b) Ensaio estático entre limites programáveis de nível
- c) Ensaio dinâmico entre frequências selecionáveis
- d) Plotagem dos ciclos de calibração com marcação de pontos críticos
- e) Determinação de índices de qualidade (sensibilidade, linearidade, histerese, repetibilidade, freq.de corte, freq.de ressonância) do transdutor
- f) Saída serial para outro computador

Por outro lado, a determinação da aceleração de referência da mesa através da medição de tempo e espaço além de acessível em preço mostra uma ampla estabilidade com o tempo, visto não se registrar variações significativas em dimensionais de escalas de cristal marcado, nem na frequência básica de osciladores a cristal. O mesmo não se pode dizer de um outro acelerômetro usado como referência.

Os módulos desenvolvidos para a composição deste equipamento sugerem o aproveitamento em outras áreas, por exemplo:

- a) A síntese de frequências por PWM no controle de motores DC sem escovas,

- b) A graficação em ciclos proposta no apêndice 2 aplicada a sensores térmicos RTD, a *strain gages*,
- c) O amplificador DC de potência em aplicações de áudio

Em uma versão industrial do equipamento, o cristal oscilador da placa do microcontrolador poderia ser montado dentro de uma câmara térmica, para garantir uma estabilidade ainda maior da base de tempos.

Em estando operacional, este equipamento supre ainda outras utilidades, além da calibração de acelerômetros piezoelétricos:

- a) a calibração de acelerômetros baseados em outros princípios,
- b) A calibração de outros transdutores de vibração, como sensores eletrodinâmicos ou de proximidade,
- c) A produção de níveis controlados de vibração para ensaios de imunidade de outros equipamentos.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [ABN/82] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-7497 Vibrações Mecânicas e Choques- Terminologia. ABNT, S.Paulo, 1982.
- [ALL/89] ALLEN, H.V.; TERRY, S.C.; DE BRUIN, D.W. Accelerometer Systems with Self-testable Features. Sensors and Actuators, Vol.20, Elsevier/ Sequoia, Nov/1989.
- [ANA/93] ANALOG DEVICES Monolithic Accelerometer with Signal Conditioning. ADXL50 Technical Data Sheet (Patents Pending), Rev.0, Norwood,MA/USA, Jun/1993.
- [ANS/69] American National Standards Institute, Inc. ANSI S2.11-1969 American National Standard for the Selection of Calibration and Tests for Eletrical Transducers Used for Measuring Shock and Vibration. ANSI, N.York, 1970.
- [BAH/89] BAHNIUK, D.E. DO-It-Yourself Encoders, (Better performance from). Machine Design, Jan/1989.
- [B&K/79] BROCH, J.T.; REDFERN, D.; RANDALL, B.; MÆRSK-MØLLER, H. et alii Mechanical Vibration and Shock Messurements. Brüel & Kjaer, 1979.
- [DIA/90] DIADUR-HEIDENHEIM Folha de Dados do Transdutor Linear LS-603. Indicadores Digitais, S.Paulo, 1990.
- [DOE/83] DOEBELIN, E.O Measurement Systems. McGraw- Hill, N.York, 1983.
- [EDO/85] EDO CORPORATION. Piezoeletric Ceramics- Catalog/ application notes. Salt Lake City.
- [KER/78] KERNIGHAN BRIAN W.; RITCHIE DENNIS M. "C" A Lin- quagem de Programação. Editora Campus, Porto Alegre, 1986.
- [INT/90] iNTEL MCS-96 8x9x Architectural Overview. USA, Oct 1990.
- [IPT/91] IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS; NIGRO, F.E.B.; LÊRES, J.B.; AMARAL, R.V. Aferição



- de Medidor de Vibrações. Relatório No.29.284, São Paulo, Jun/1991.
- [LIC/81] LICHT, TORBEN R.; ZAVERI, K.; PHIL, M. Calibration and Standards. Vibration and Shock Measurements. Brüel & Kjær Technical Review, No.4, Nærum, Denmark, 1981.
- [LIC/87] LICHT, TORBEN R.; ANDERSEN, HENRIK; Trends in Accelerometer Calibration. Brüel & Kjær Technical Review, No.2, Nærum, Denmark, 1987.
- [LOW/86] LOWER, S.M.; HEWETT, R.A. Design and Construction of a Test Facility to Calibrate Accelerometers at any Temperature in the Range -50 to 200°C over the Frequency Range 20 to 600 Hz. Journal of the Society of Environmental Engineers, Vol.25-No.2, Jun/1986.
- [NOR/82] NORTON, H.N. Sensor and Analyzer Handbook. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ/USA, 10<sup>a</sup> Ed., 1982.
- [PRO/92] PROKIN, M. Dynamic Response of a Frequency Measuring System. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.41-No.3, Jun/1992.
- [SER/86] SERRIDGE, M.; LICHT, T.R. Piezoelectric Accelerometer and Vibration Preamplifier Handbook. Brüel & Kjaer, 1986.
- [TIN/87] TINHAM, B. The Frightening Facts about Accelerometers. Control & Instrumentation, Vol.19-No.7, Jul/1987.
- [TUS/87] TUSTIN, W. How to Calibrate Accelerometer Systems. Evaluation Engineering, Vol.26-No.5, May/1987.
- [VAN/89] VAN PAEMEL, M. Interface Circuit for Capacitive Accelerometer. Sensors and Actuators, Vol.17, Elsevier/ Sequoia, Neth., May/1989.
- [YAC/83] YACUBSOHN, R.V. El Diagnostico de Fallas por Analisis Vibratorio. Edicomp, S.Paulo, 1983.

# Appendices

## SINE WAVE SYNTHESIS USING MICROCONTROLLER PWM SUPPORT

Edson Schüler

*Abstract - Many microcontroller IC's incorporate a built-in PWM circuit whose output can be filtered to obtain an analog voltage signal. In certain cases, one needs a sinusoidal output signal to cope with requirements such as galvanic insulation or excitation for inductive equipment. This work presents a means of generating a collection of frequencies using the PWM output of an INTEL 8098.*

### 1. Overall Description

The purpose of this work is to present operational solutions for the quick specification of software and circuitry to generate sinusoidal waves, without going deep into discrete signal theory, but offering tools to ease the engineering work.

The work develops from general considerations about the PWM technique, going to building a sinusoid, and entering next in the details of software and hardware pieces to practically implement this function. Next, a small program written to serve as designing tool is presented, followed by experimental results achieved and some conclusions about the method. A symbology table, references and annexes close the essay.

A Pulse-Width-Modulated signal (PWM) is formed by pulses whose rising edges are equally spaced in time, but with the widths proportional to the signal intensities intended for that period. An appropriate filtering can recover the signal from the mean energy conveyed by the pulse width. For instance, a saw-tooth wave would be so represented by a PWM signal:

[CTV\_PWM]

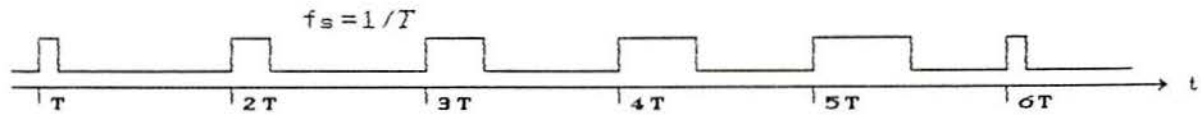


Fig 1 - PWM pulses that, filtered, form a saw-tooth wave

There is a theoretical limit for the higher frequency of the signal that can be represented by the PWM, according to Shannon's theorem, which is  $f_{\max} = 1/2T$ ,  $T$  being the pulse period. Actually, as an ideal filter is unfeasible, we must allow for much broader margins, say one decade below, for the maximum frequency we want to generate.

Through the filtering, we want to eliminate the sampling frequency  $f_s$ , and the high frequencies from the pulse edges, our signal having frequencies much less than  $f_s$ . So we need a Low-Pass-Filter, and the block diagram of our system is as follows

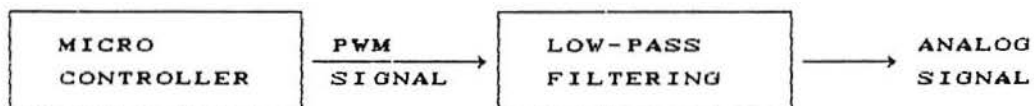


Fig 2 - Functional blocks for PWM-sine wave generation

Now let's consider that we want to generate a periodic signal with frequency  $f_0$ . Given  $f_s$ , and noting the maximum frequency constrain, we are only allowed to build signals sub-harmonic to  $f_s$ , and below the first one

$$f_0 = \frac{f_s}{m} \quad (m \in \mathbb{N} \mid m \geq 2) \quad (1)$$

This limits severely the set of feasible frequencies, given a particular crystal, mainly in the neighborhood of  $f_s$ .



## 2. Building a sinusoid from discrete samples

Consider now a sinusoidal signal, that is to be defined from a given number of sample values to constitute a complete cycle table that can be used in a circular form. How many samples at least for the description of a sine cycle? Noting that the semi-cycles are symmetrical and starting from a number of samples per cycle  $N_{sc} \geq 2$ , see the following figure

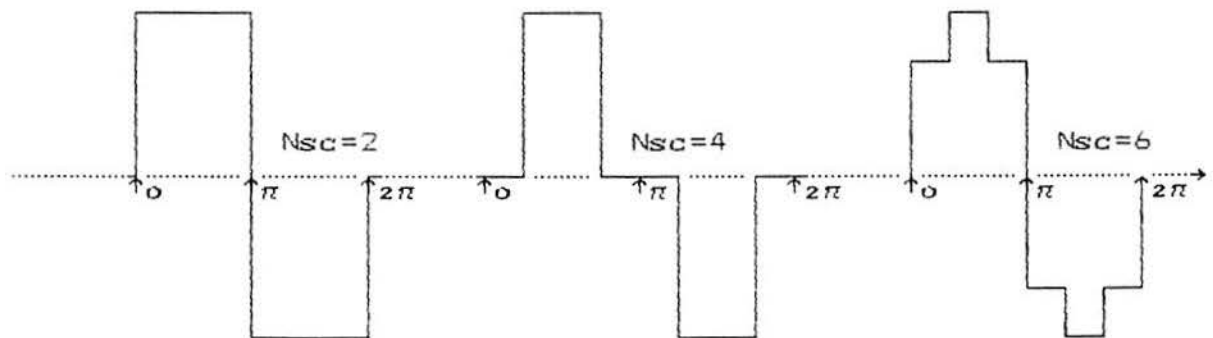


Fig 3 - Sine construction with different Numbers of Samples per Cycle ( $N_{sc}$ ), using discrete values

Here the angular points  $0$ ,  $\pi$  and  $2\pi$  are marked with arrows. We can see that, aside from the deformation due to the discrete character of the signals, the use of an even number of samples per semi-cycle, like with  $N_{sc}=4$ , introduces a zero slope at  $\pi$ , where the sine wave has a maximum slope, thus increasing distortion. To minimize this effect, we can state  $N_{sc} = 2(2n+1)$ , with  $n > 0$  (to include the margin for non-ideal filtering), so that

$$N_{sc} = 6, 10, 14, 18, \dots 4n+2 \quad (2)$$

which puts a new limit for our upper frequency, now defined as

$$f_0 = \frac{f_s}{N_{sc0}} = \frac{f_{PWM}/2}{4n+2} \Big|_{n=1} \quad (3)$$

which, for the 12 MHz clock, yields  $f_0 \cong 1,302$  Hz. We can call the frequencies  $f_m$  immediate frequencies, as they evolve naturally from the hardware characteristics and minimal distortion considerations.

## 2.1 Generating a logarithmic scanning

If we need to test a system response, a set of frequencies in geometrical progression is highly desirable, as it implicitly produces a Bode plot of a frequency spectrum. To do so, we want to start from a base frequency and to double it, for instance, to progress in octaves. In this approach we start from one of the immediate frequencies, which we can best obtain from our system, as the higher one, halving it in successive octaves down to the lower frequency of interest. To use octaves, we change the number of samples, starting from  $N_{sc}$ , according to a doubling succession, starting from a valid value in (2), like this

$$N_{sc_i} = 2^i \cdot 10 = 10, 20, 40, 80, \dots \quad (4)$$

As a matter of practice, we can build a table of samples with the highest number of elements we will need, and scan it modularly 1 by 1, 2 by 2, 4 by 4 and so on, in steps  $MS$ . This procedure saves space and produces a constant waveform through all the selected frequencies, as shown in the figure that follows.

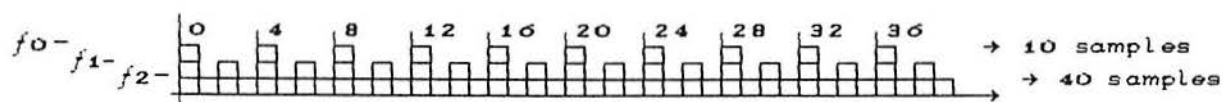


Fig 4 - Scanning a table in modular hops for various  $N_{sc}$

The figure illustrates the using of a 40 entries table from which we can generate 3 frequencies with at least 10 samples per cycle, so that  $f_0 = 2$   $f_1 = 4$   $f_2$ , provided this samples are fed in the PWM register at the constant rate  $f_s$ .

## 2.2 Generating a set of arbitrary frequencies

In the previous method, we used a Stepping Modulus for running through a table of samples (1 by 1, 2 by 2, etc..) - call it  $MS$ . We shall note that  $MS$  doesn't need to be an integer factor of the table size, say, to cover exactly the size of table in even steps. When we wrap around the table, maybe only one sample is left, and our step is, e.g., 3. All we have to do is to transport this

remainder of 2 through the table start, getting the 3<sup>rd</sup> sample in the following turn, and so on. Let's illustrate this running through a table of 7 samples with a MS of 3:

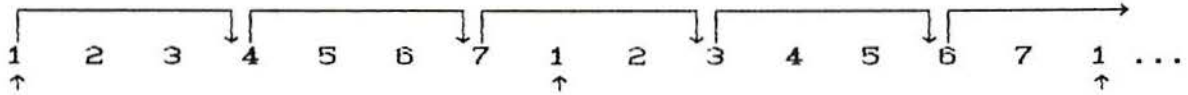


Fig 5 - Wrapping around the table with a sliding phase

As we can see, the index of samples in each run slides by some factor, but this causes no harm to the output values, which are still synchronous to the sine wave intended.

A further improvement is the introduction of a Repetition Modulus, which we will call **MR**, and meaning the number of PWM cycles we let go before we change to the next sample value. This modulus allows us also to lower the frequencies without extending the table size beyond some reasonable limit.

Finally we get to the point of establishing the frequencies we can generate from this method. A generated frequency will be directly proportional to the PWM rate -  $f_{PWM}$  - and to the Stepping Modulus - **MS**. On the other hand, it will be inversely proportional to the total Number of Samples in the table -  $N_s$  - and to the Repetition Modulus - **MR**. So we have

$$F_i = \frac{MS}{MR} \times \frac{f_s}{N_s} \quad (5)$$

where the fraction **MS/MR** can be used by the software to control the generation of a much broader set of frequencies, **MS** having the higher limit of, say,  $N_s/N_{sc}$ , and **MR** causing the effect of lowering the actual  $f_s$ , which can enter the Low-Pass filter band distorting the sine wave output.

### 2.3 Table size and accessing mode

As the samples must be discrete values with 8 bits in a double run (from "-1" to "+1" and vice-versa), it's easy to see that for tables larger than 512 entries the values are only being repeated. To save

memory we access the table through 2 indexes - **MS**, which sets the distance between successive samples to use, and **MR**, which sets the number of  $T_s$  periods to repeat before changing the PWM value.

Considering the use of a minimum 6 samples/cycle, the number of basic frequencies is  $k = \log_2(512/6) \cong 6.42 \rightarrow 7$ , which we can extend through the repetition modulus **MR**. Thence a good size will be  $N_s = 2^7 \cdot 6 = 768$  entries. For a set of 10 frequencies and using the 12 MHz clock, we get the following table

TABLE I

*Immediate frequencies and indexes*  
( $f_c = 12 \text{ MHz}$  /  $f_{pwm} = 15.625 \text{ kHz}$ )

Frequency		Indexes	
Code	(Hz)	MS	MR
$f_0$	1,302.08	64	1
$f_1$	651.04	32	1
$f_2$	325.52	16	1
$f_3$	162.76	8	1
$f_4$	81.38	4	1
$f_5$	40.69	2	1
$f_6$	20.35	1	1
$f_7$	10.17	1	2
$f_8$	5.09	1	4
$f_9$	2.54	1	8

A further evident step is to keep only one semi-cycle in the table, inverting the value at the time of using, for this reduces the table size to half, say 384 entries in the case.



### 3. Software Routines and hardware devices

In order to implement the sine-function generation, we chose an 8098  $\mu$ C. So, we need a glance on its PWM control, and a software driver routine our application can call, which we describe next.

#### 3.1 Timing within the 8098 hardware

The 8098 is driven by a crystal oscillator clock, at its basic frequency, say  $f_{XTAL}$ , and has a specific hardware to implement a PWM output, according to the diagram in the figure below.

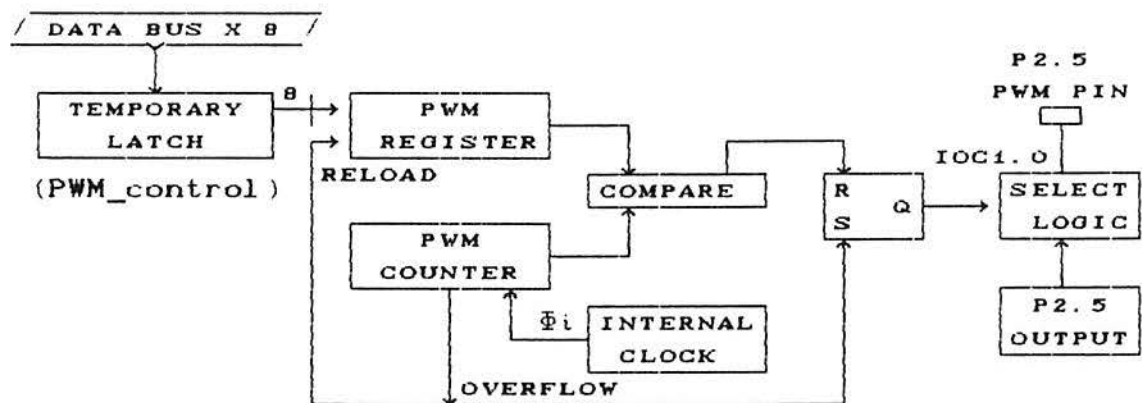


Fig 6 - Pulse-Width-Modulated Output control - block diagram

Each 3 clock pulses generate a phase pulse (signals  $\Phi_A$  and  $\Phi_B$ ), in what is called one state time. Each 256 state times completes a PWM cycle, driven by an one-byte counter, during which the PWM signal is kept high until it matches a PWM-register, yielding a programmable duty cycle from 0% (0) to 99.6% (255).

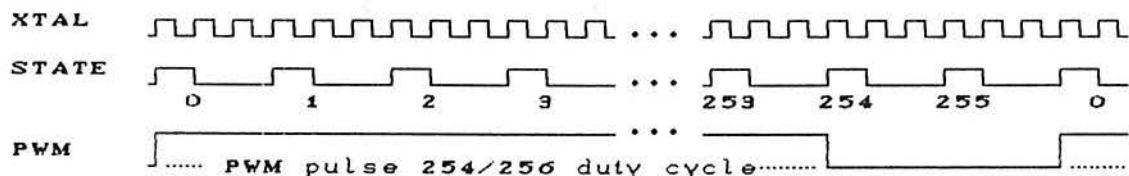


Fig 7 - Waveforms within the 8098 timing circuitry

and, as there's no result in changing the PWM register value at some specific place during the PWM cycle (this value will only be

accounted for the next run), the maximum frequency for conveniently updating the duty cycle factor is

$$f_{PWM} = \frac{f_{XTAL}}{3 \times 256} \quad (6)$$

and, in fact, for a time varying signal, things will work better if we update the PWM register in a synchronous way. For instance, with a 12 MHz clock, the PWM frequency is 15625 Hz. On the other hand, the processing of samples at this rate overloads CPU capability, leaving no time to run the application program. So, the fastest sample-updating frequency we can use is  $f_s = f_{PWM}/2$ .

Controlling the PWM generation in the 8098 simply means updating the one-byte register `PWM_control` (location 17H) at the desired time.

For the timing of sample-updating procedure, we use another built-in feature called High-Speed-Output (HSO), which consists in a hardware programmable event timer that holds up to 8 events, chosen among 6 output pins, 4 SW timers, A/D conversion, or reset functions. The feature we use is the software-timer-1 register, set to interrupt the CPU at each 2 PWM cycles ( $2 \times 256/8 = 64$  timer counts).

Scheduling an event with the HSO hardware is done in 2 steps - first by loading a command tag in `HSO_command` register (location 06H), followed by the loading of time of event in `HSO_time` register (location 04H), which is referred to the 8098 TIMER 1. The command tag is set as

$$sw\_timer1\_on = 0tsi\ nnnn\ B = 00011000B = 18H$$

where  $i=1$  sets interruption support, and  $n=8$  indicates `SW_TIMER1` event. The time value is obtained from a virtual timer `vtime`, first set from `TIMER1`, and incremented by 64 (`SIN_TSH`) at each interrupt.

### 3.2 Software routines `SIN_INIT` and `SIN_DRV`

The software support is developed in a driver-like manner, through an initialization routine (`sin_init`) that initializes counter variables, connects interrupt vector at 400AH to the interrupt handler routine (`sin_drv`), sets interrupt mask (20H) for `SW_TIMER1` and enables the interrupt system, after having loaded the first

event tag in the HSO hardware (virtual time set by TIMER 1).

We call TS the table of samples, with  $N_s/2$  1-byte entries, with values in the range [0:127]. This table is accessed by a pointer *isample*, which is incremented in steps *nstep*, extracted from a table *MS(ifreq)* at each zero-crossing of the sine wave (to keep minimum glitch in frequency changes). A toggle variable *isign* indicates the semi-cycle in progress (positive/negative). The driver is called at each sample hopping cycle (TSH), but the interrupts are modulated in repetition groups of *nrepeat* times, controlled by the *irepeat* counter before changing the PWM contents. *nrepeat* in turn is updated together with *nstep* from table *MR(ifreq)*.

The application software only needs to establish the *ifreq* index to the frequency wanted (Table 1.1), or -1 to turn the signal off. A sample program in C, called *PWMSIN.C* is shown in Annex A, which uses routines *sin\_init* and *sin\_drv* to keep the sine wave running, using the PWM register output and the HSO TIMER1 interrupt. The tables MS, MR and TS must be changed to conform to the specific situation, what can be done through the designing tool *PWMSIN.BAS*.

### 3.3 Table Computation

The computation of a table of  $N_s$  integer samples involves a quantization error, which must be minimized. The mid value 128 is chosen as *GND*, the peak value being up to 127. As we can choose the peak value at will, this choice is used to minimize the quantization error. Only the upper 10% are considered, because the further lowering of peak value will increase error. The square average error between the real sine values  $\{V_R = V_{peak} \cdot \sin(\theta)\}$  and the rounded discrete values  $\{V_D\}$  is computed point by point through the  $N_s$  samples of a cycle, according to

$$Ave. Sq. error = \left[ \sum_{i=0}^{N_s} \frac{(V_{Ri} - V_{Di})^2}{N_s} \right]^{1/2} \quad (7)$$

The average square error for each peak-value in the interest band is compared, and the least-error peak-value set is used to build table

TS.

### 3.4 Low-Pass Filter

The filtering must be simple, not adding too much circuitry to the board. We can choose between a 3<sup>rd</sup> order Bessel filter, which provides a 20 dB attenuation at  $5f_c$ , and a 3<sup>rd</sup> order 3 dB Chebyshev filter with 40 dB attenuation at  $5f_c$ , depending on how much harmonic distortion we can afford and how high a frequency we want to generate. One good use of this system is to set the number of samples/cycle  $N_{sc}=10$ , which results in the upper frequency  $f_o = f_s/10$ , and setting the filter cut-up at  $2f_o = f_c = f_s/5$ , so that  $f_o$  is passed with gain  $\cong 1$  and  $f_s$  attenuated by 10 or 100 (depending on the type of filter used).



#### 4. The designing Tool

As there's a lot of work to do, a designing program was written to ease the task of setting an application such as described. The program is called PWMSIN.BAS and yields two main outputs - a data-sheet in the screen to be printed, summarizing the frequencies to synthesize with the indexes MS and MR to use, and the filter circuit already plotted with commercial component values, and second, a file called TABSIN.H, with the tables MS, MR and TS in C format, to be included by the routine PWMSIN.C.

The program builds vectors of a maximum of 10 frequencies, in one out of 2 approaches - an logarithmic scan in octaves, or a list of selected frequencies entered by the user in descending order.

The first step is establishing the number of samples/cycle minimum to consider (Nsc), the lower frequency under consideration, and to choose the XTAL frequency. If a XTAL is specified from the start, PWMSIN computes immediately the exponential scanning. If the XTAL is omitted (by typing Enter), a list of frequencies is asked to the user. A procedure tries to assure an harmonic approach for the first 2 higher frequencies - if not possible, for the higher alone - and lists the 10 best crystal frequencies to use. The user can choose by the letter one of the computed frequencies, or type the frequency of the available XTAL he has at hand. From the XTAL specified, the sample table is dimensioned and the vector of frequencies to synthesize is listed with the nearest approaches possible.

The second step is to compute and record the tables in file TABSIN, which is asked to the user. When done, the average square error obtained is presented, together with table size.

The third step is the computation of Low-Pass filter. The cutting frequency is asked to the user, and, if omitted, used as  $2f_0$ . The filter is computed fixing the resistor values and computing the capacitances [STOUT-KAUFMAN], which are further achieved by the parallel of up to 3 capacitors in each point, commercial values, adding up to within 1% the computed value. To switch from Bessel to

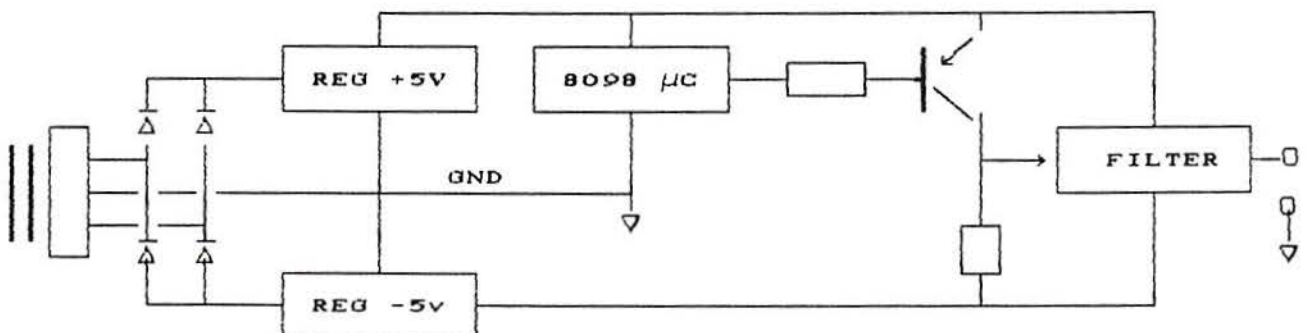
Chebyshev, the user needs to type a ">" instead of the cutting frequency.

The result stays in the screen to be printed ([Print-Screen] key), provided the user has run the program GRAPHICS previously, and a sample is shown in Annex B. Once the file TABSIN is done, it can compile with the C routine PWMSIN.C - left to the user the application program, which only sets the variable ifreq.

## 5. Experimental Results

A sample was built around a 8098 kit with a 6.144 MHz oscillator crystal, for the logarithmic scanning of frequencies down to 2.6 Hz, as shown in the data-sheet in Annex B. A Chebyshev Low-Pass filter using a TL074 amplifier and commercial components was built on a proto-board approach.

The amplifier supply can pose some problems. For the tests, we used an independent +12V source, and a R-R division with one amplifier port to generate a virtual ground ( $V_{cc}/2$ ), which we connected to the 8098 board GND, so that from the signal reference, we worked in a +6V/-6V environment. For a permanent circuit, we suggest using a center tap transformer to yield symmetrical voltages, using +5V/GND for the digital part and +5V/-5V for operational amplifiers, interfacing the PWM signal through a PNP transistor, like shown in Fig.8, which protects the 8098 output pin from negative voltages. It's also necessary to provide some attenuation in the filter input, through a resistive division.



*Fig 8 - Suggestion for feeding digital and analog circuitry and interfacing PWM signal*

Testing this prototype, we found that even using the steep Chebyshev filter, the Low-Pass cutting frequency must be as low as  $1/3 f_s$ , otherwise the sampling component will distort the wave up to 20%. This limits the higher frequency that can be generated with up to 10% distortion to  $f_0 = f_{XTAL}/9216$ , where this number is the following product: 6 samples/cycle  $\times$  2 PWM periods/sample  $\times$  256 states/PWM period  $\times$  3 clocks/state. The pictures below show waveforms captured

by a digitalizer system, showing the 5.2 Hz and the upper 666.7 Hz waves.

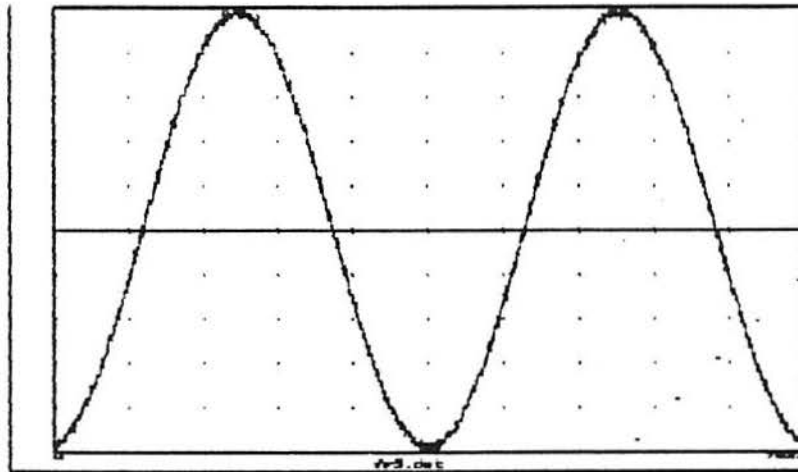


Fig. 9 - Waveform obtained for 5.2 Hz after filtering

The algorithm was optimized at frequency changes, so that when the applications asserts a new ifreq, the drives waits for a zero-cross to step the index without glitches in the output waveform, as can be seen in Fig.10.

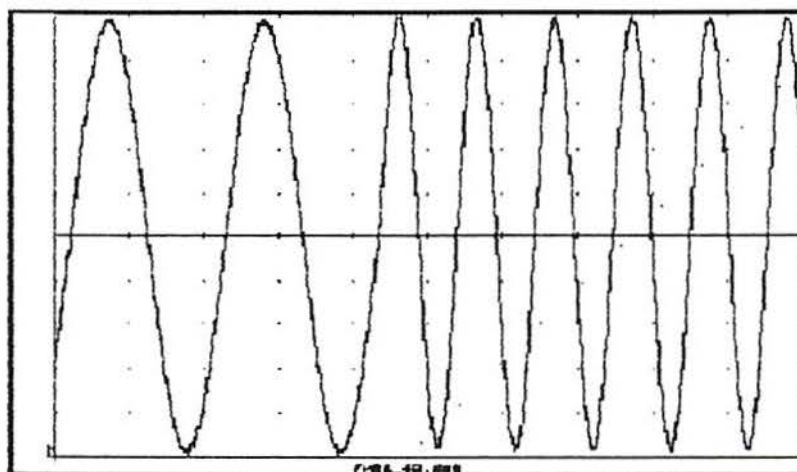


Fig. 10 - Transitions on zero-cross prevent glitches



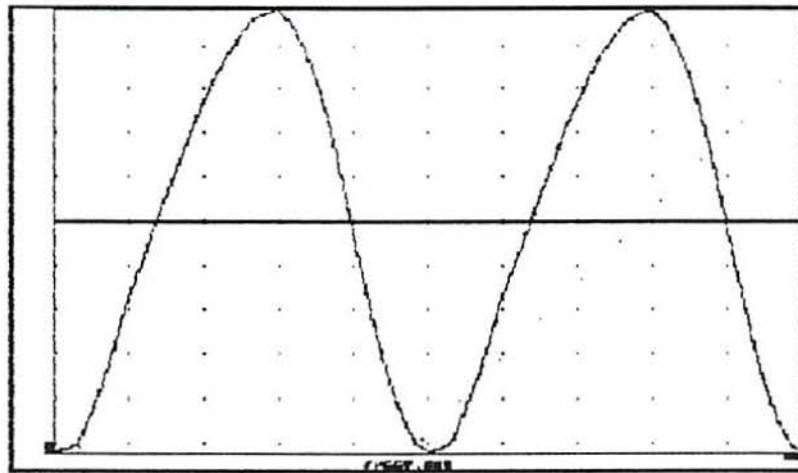


Fig. 11 - Waveform for 666.7 Hz, shows greater distortion

The harmonic distortion was measured with a HP 334A distortion analyzer with the readings shown on the following table.

TABLE II

PWM-formed sine waves  
 $f_{XTAL} = 6.144 \text{ MHz}$   
 $f_c = 1340 \text{ Hz}$

Indexes		Frequency ( Hz )	Harmonic Distortion
MS	MR		
64	1	666.7	9 %
32	1	333.3	5 %
16	1	166.7	4 %
8	1	83.3	4 %
4	1	41.7	7 %
2	1	20.8	3 %
1	1	10.4	4.5 %
1	2	5.2	8 %

The program PWMSIN.BAS, for table computation and filter design, is available through EMAIL (see Note at the end). It can also be adapted for 8096, changing all occurrences of "768" by "512".

### 5.1 Conclusions

The high points in this method are frequency precision and stability (same of crystal), and constant amplitude of the output wave through the hole spectrum of frequencies generated.

This development is specially suited for control applications, wherever a microcontroller is already included to process the control-loop. In controlling AC driving motors, the filter is omitted, and the PWM signal can directly drive the power switches (transistors or thyristors).

In filtering to produce an analog sine wave, the quality (distortion) can be improved in the measure of how far under the sample switching frequency the highest frequency can be placed, being a compromise relation. You make your choice and pay the fee.

## SYMBOLLOGY

IOC1	- Input/Output Control 1 (8098)
$f_o$	- Highest conveniently generated frequency
$f_{PWM}$	PWM cycle frequency
$f_s$	- Sample switching frequency
MR	- Modulus of Repetition of a sample. The number of interrupts of frequency $f_s$ the driver will count before going to the next sample in table TS
MS	- Modulus of Stepping on the Sample Table. The increment for the index accessing the samples in table TS
$N_s$	- Number of samples per cycle in the table
$N_{sc}$	- Minimum number of samples per cycle adopted
PWM	- Pulse Width Modulation
SIN_NM	- Number of Modulus factors in tables MR and MS (number of frequencies to generate)
SIN_TSH	- Time of Sample Hopping. # of TIMER1 states/interrupt
TS	- Table of Samples (half-cycle, $N_{sc}$ elements)
XTAL	Crystal (oscillator)

## REFERENCES

- [INT/90] INTEL: MCS-96 8X9X Architectural Overview, Oct/1990, p.1-5, 1-34/1-36, 1-38/1-39.
- [KER/78] KERNIGHAM,B.W.; RITCHIE,D.M.: The C Programming Language, Prentice-Hall, Inc., 1978.
- [STO/76] STOUT, D.; KAUFMAN,M.: Handbook of Operational Amplifier Circuit Design, McGraw-Hill, Inc., 1976, p.10-8/10-12
- [SCH/88] SCHEID, F.: Schaum's Outline of Theory and Problems of Numerical Analysis, second edition, McGraw-Hill, Inc., 1988, Chap.21.

# \*\* SINE WAVE GENERATION WITH 8098 PUM \*\*

Fxtal = 10,321,920 Hz  
 Fs = 6,720.0 Hz  
 Number of samples  
 Min/cycle (Nsc) = 14  
 Max/cycle (Ns) = 448

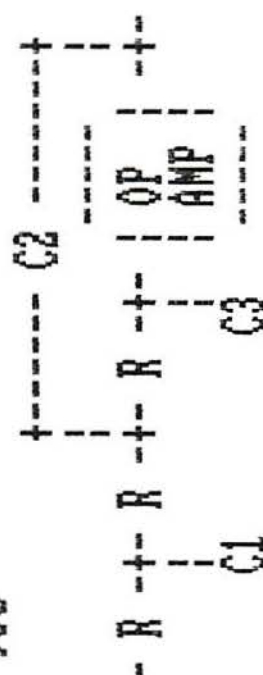
$$F_i = (M_s/M_r) \times (F_s/N_s)$$

i	Ms	Mr	Freq	Fi (Hz)	Er%
0	32	1	480	480.0	0.0
1	29	1	440	435.0	1.1
2	25	1	380	375.0	1.3
3	44	3	220	220.0	0.0
4	8	1	120	120.0	0.0
5	4	1	60	60.0	0.0
6	10	3	50	50.0	0.0
7	2	5	6	6.0	0.0

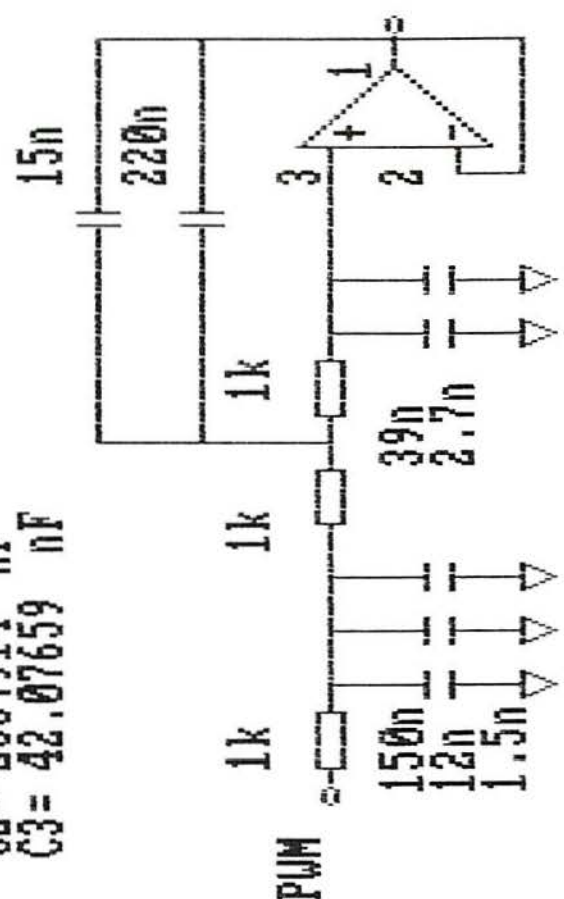
Samples table in TABSIN= 224  
 Quantization Ave.Error= 0.2%

= BESSEL 3rd ORDER LOW-PASS FILTER =

Fc (Hz)= 960



R= 1000  $\Omega$   
 C1= 163.797 nF  
 C2= 235.914 nF  
 C3= 42.07659 nF





\*\* SINE WAVE GENERATION WITH 8098 PUM \*\*

Fxtal = 6,144,000 Hz  
 $F_s = 4,000.0$  Hz  
 Number of samples = 6  
 Min/cycle (Nsc) = 384  
 Max/cycle (Ns) =

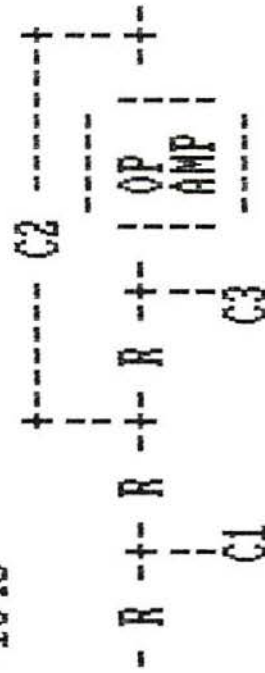
$F_i = (M_s/M_r) \times (F_s/N_s)$

i	$M_s$	$M_r$	$F_i$ (Hz)	Er%
0	64	1	666.7	=
1	32	1	333.3	=
2	16	1	166.7	=
3	8	1	83.3	=
4	4	1	41.7	=
5	2	1	20.8	=
6	1	1	10.4	=
7	1	2	5.2	=
8	1	4	2.6	=

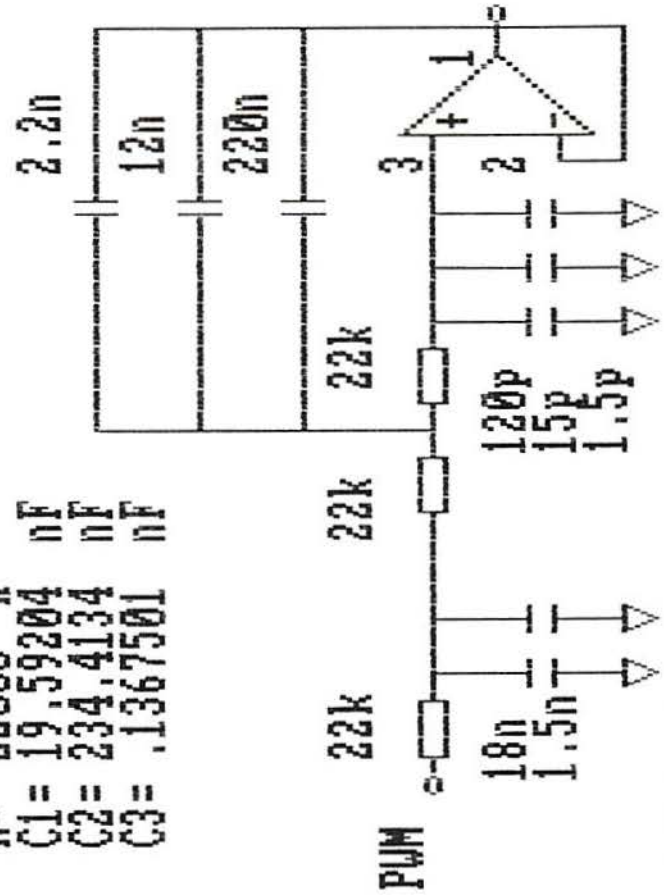
Samples table in TABSIN= 192  
 Quantization Ave. Error= 0.2%

= CHEBYSHEV 3rd ORDER LOW-PASS FILTER =

$F_c$  (Hz) = 1340



$R = 22000 \Omega$   
 $C1 = 19.59204 \text{ nF}$   
 $C2 = 234.4134 \text{ nF}$   
 $C3 = .1367501 \text{ nF}$



```

#define SIN_SIZE      192
#define SIN_TSH       64      /* 64 x 8 states/Tmr1 = 2 PWM */
#define SIN_NM        9
const int MS [SIN_NM] = { 64, 32, 16, 8, 4, 2, 1, 1, 1, 1 };
const int MR [SIN_NM] = { 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 4, 8 };
const unsigned char TS [SIN_SIZE] = {
    128, 130, 132, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146,
    148, 150, 152, 154, 156, 158, 160, 162, 164, 166,
    168, 170, 172, 174, 175, 177, 179, 181, 183, 185,
    186, 188, 190, 192, 193, 195, 197, 199, 200, 202,
    203, 205, 207, 208, 210, 211, 213, 214, 216, 217,
    219, 220, 221, 223, 224, 225, 226, 228, 229, 230,
    231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240,
    241, 242, 243, 243, 244, 245, 245, 246, 247, 247,
    248, 248, 249, 249, 250, 250, 250, 251, 251, 251,
    251, 252, 252, 252, 252, 252, 252, 252, 252, 252,
    252, 252, 251, 251, 251, 251, 250, 250, 250, 249,
    249, 248, 248, 247, 247, 246, 245, 245, 244, 243,
    243, 242, 241, 240, 239, 238, 237, 236, 235, 234,
    233, 232, 231, 230, 229, 228, 226, 225, 224, 223,
    221, 220, 219, 217, 216, 214, 213, 211, 210, 208,
    207, 205, 203, 202, 200, 199, 197, 195, 193, 192,
    190, 188, 186, 185, 183, 181, 179, 177, 175, 174,
    172, 170, 168, 166, 164, 162, 160, 158, 156, 154,
    152, 150, 148, 146, 144, 142, 140, 138, 136, 134,
    132, 130 };

```

```

/* PWMSIN.T      ANNEX A-3      INCLUDE TABLES GENERATED BY PWMSIN.BAS */

```

```

#include <8096.h>           /* 8x9x library */
#include <tabsin.t>         /* Tables and parameters */
#include <x.h>

#define SIN_GND             128
#define VETOR_0             (int *)0x400A /* step vector to save context*/
#define SW_TMR1_ON          0x18
#define TRUE                1
#define FALSE               0

void sin_drv(void), sin_init(void);      /* forward routines */

typedef unsigned int word;               /* data types */
word irepeat, nrepeat, nstep, isample, sign; /* variables */
int ifreq;
char x;

inicio()                               /* MAIN PROG - CYCLE FREQUENCIES */
{
    word i,j;
    sin_init();
    while(1) {for (ifreq=SIN_NM-1;ifreq>=0;ifreq--) wait_kbd();}
}

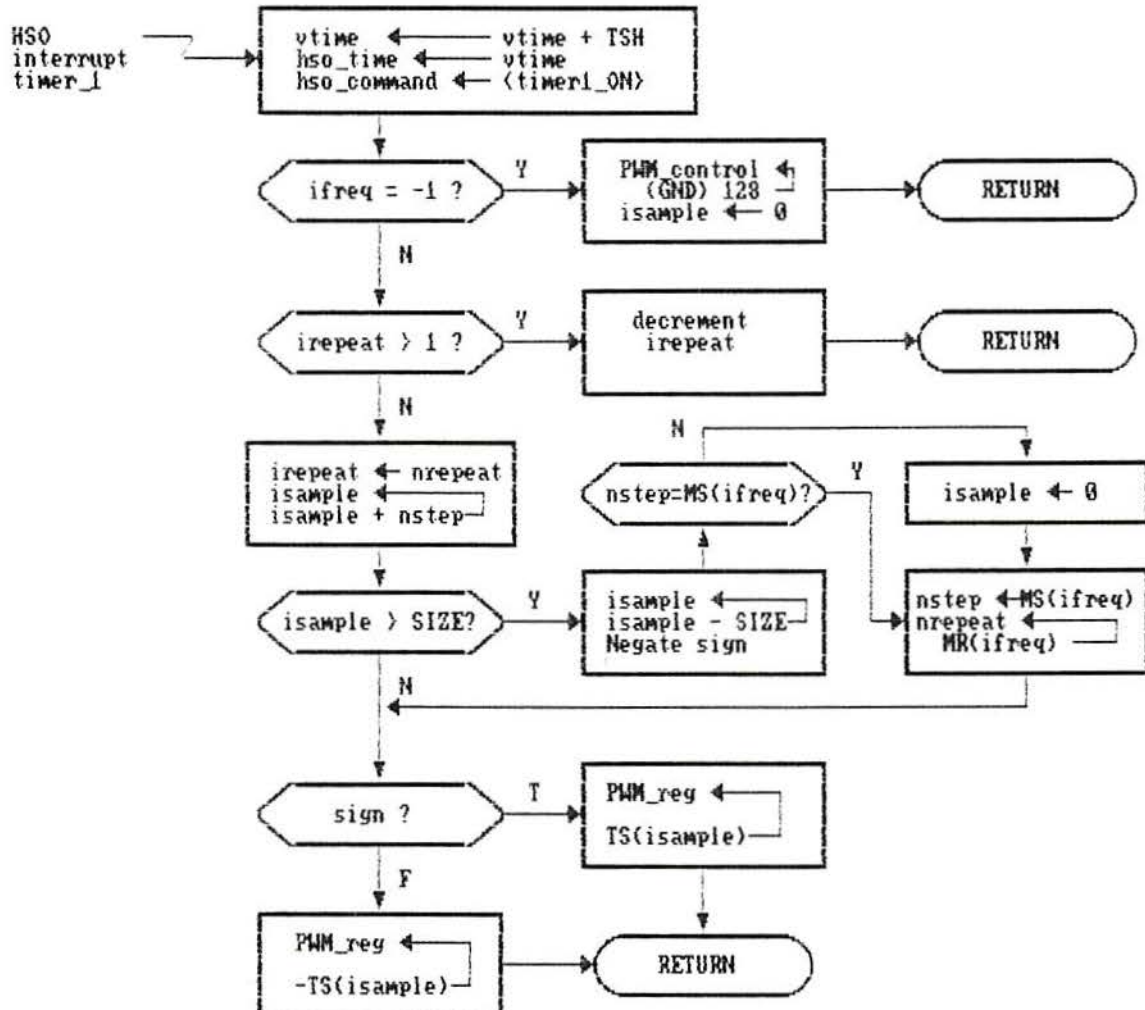
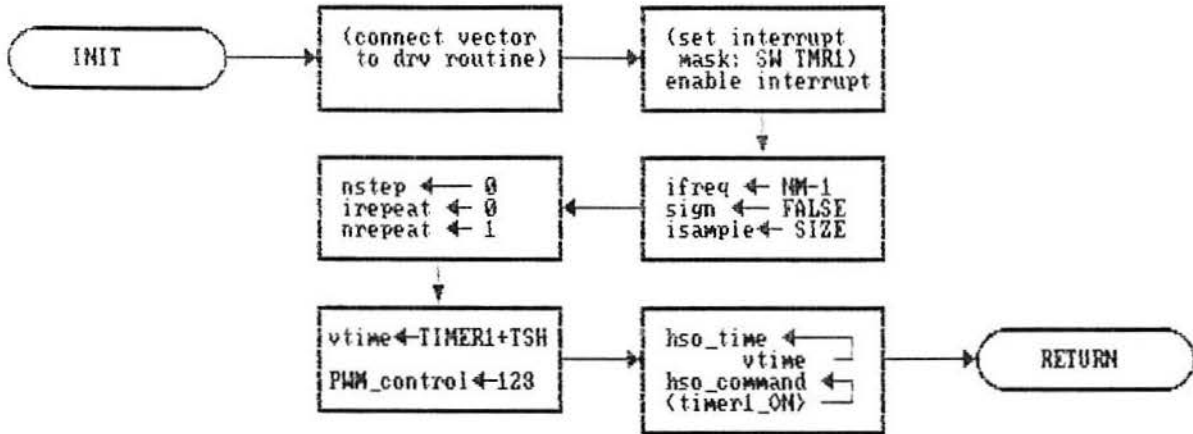
void sin_init(void)                    /* DRIVER INITIALIZATION */
{
    *VETOR_0 = (int)sin_drv;
    isample = SIN_SIZE;
    irepeat = nrepeat = nstep = 0;
    ifreq = SIN_NM-1; sign = FALSE;
    pwm_control = SIN_GND;
    hso_command = SW_TMR1_ON; /* Start HW and virtual timers */
    hso_time = vtime = timer1 + SIN_TSH;
    int_pending = 0;
    int_mask |= 0x20; /* Enable SW TIMER1 interrupt */
    enable();
}

void sin_drv(void)                     /* INTERRUPT HANDLING ROUTINE */
{
    hso_command = SW_TMR1_ON; /* Retrigger interval timer */
    hso_time = vtime = vtime + SIN_TSH;
    if (ifreq== -1) /* -1 switches OFF wave (DC) */
    {
        pwm_control = SIN_GND; /* DC central value */
        isample = 0; /* Phase zero to restart */
        return;
    }
    if (irepeat>1) { irepeat--; return; } /* Count repetition */
    irepeat = nrepeat; /* Restart repetition cycle */
    if ((isample += nstep) >= SIN_SIZE) /* On zero crossing */
    {
        isample -= SIN_SIZE; /* wrap-around table of samples */
        sign = !sign; /* change sign of semi-cycle */
        nrepeat = MR[ifreq]; /* update parameters due to freq */
        if (nstep != MS[ifreq]) isample = 0; /* phase zero */
        nstep = MS[ifreq]; /* update step value */
    }
    if (sign) pwm_control = - TS[isample]; /*sample polarity */
    else pwm_control = TS[isample];
}

/* PWMSIN.C ANNEX A-2 SOFTWARE ROUTINES FOR SINE GENERATION */

```







## REGISTRANDO O ENSAIO DE TRANSDUTORES

Edson Schöler

*Resumo - O laudo de calibração de um transdutor é o certificado de suas características de desempenho, servindo tanto como base de informação para o projetista que o vai usar, como atestado de conformidade para o técnico que o vai substituir. Este estudo discute a composição de uma folha de ensaio mínima, usando os atuais recursos de processamento digital disponíveis em instrumentação.*

*Abstract - A transducer calibration record is the certificate of its performance characteristics, serving even as information base for the designer who intends to use it, as well as conformity attestation for the technician who will use it in substitution. This study discusses a minimal essay sheet composition, using the present digital processing resources available in instrumentation.*

## 1. Introdução

No contexto da instrumentação eletrônica atual, *transdutores* são os dispositivos que produzem uma saída elétrica como resposta a alguma determinada grandeza física que se pretende medir com os mesmos. Esta saída elétrica pode ser um parâmetro ativo, como tensão ou corrente, ou passivo, como resistência, capacitância, indutância, etc [DOE/90]. A grandeza física que se quer medir, ou *mensurando*, pode ser qualquer grandeza de interesse, seja ela intensiva

(temperatura, pressão, força) ou extensiva (calor, nível, massa).

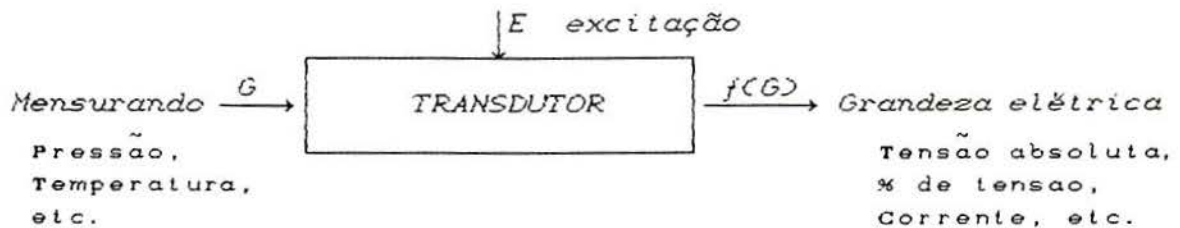


Fig 1.1 - Um transdutor traduz a grandeza do mensurando em grandeza elétrica

De uma forma ideal, esta função de transdução deveria ser linear e sem deslocamento, como por exemplo  $Y = k \cdot G$ , onde  $k$  seria o coeficiente de proporcionalidade entre a grandeza  $Y$  produzida e a  $G$  que se pretende medir. Na prática, todos os transdutores apresentam relações mais complexas, que traduzem os efeitos físicos pelos quais a grandeza  $G$  influi na grandeza  $Y$ , e que podem se aproximar, dentro de uma faixa de erro, de uma reta [NOR/82].

Para o projeto e fabricação de instrumentos e sistemas de instrumentação e controle, é necessário pensar nos transdutores como blocos operacionais perfeitos, que submetidos a uma excitação adequada (excitação e estimulação dentro de limites estabelecidos) fornecem uma saída elétrica conhecida e função do estímulo aplicado, ou mensurando. Além disso, devem ser intercambiáveis, isto é, qualquer indivíduo do mesmo modelo possui as mesmas características generalizadas.

O fato de transdutores serem fabricados em linha, com os mesmos materiais, mesmas dimensões e processo de fabricação contribui para uma uniformidade, mas não a garante. Para considerar transdutores como células uniformes de mesmas características é necessário definir o que se entende pelas mesmas. Assim, pode-se arrolar o seguinte quadro de características [NOR/82]:

a) Mensurando - o que se destina a medir

- a1) identificação - Ex: temperatura
- a2) alcance - limites da medição. Ex:  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$
- a3) faixa - extensão medida. Ex (acima):  $160^{\circ}\text{C}$
- a4) sobrecarga - limite sem danos. Ex:  $200^{\circ}\text{C}$
- a2) impedância ao mensurando. Ex:  $C_{th} = 7,6 \text{ cal}/^{\circ}\text{C}$

b) Projeto Elétrico - como usar, eletricamente

- b1) grandeza elétrica de saída - Ex: resistência
- b2) alcance da saída - Ex:  $94,6 \Omega$  a  $198,7 \Omega$
- b3) excitação - Ex: Max. 5 mA (1 V)
- b4) impedância de entrada - Ex:  $R_i \cong 100 \Omega$
- b5) impedância de saída - Ex:  $R_o \cong 200 \Omega$
- b6) resistência de isolamento - Ex:  $R_s > 10 \text{ M}\Omega$
- bn) outros - blindagem, ondulação, conteúdo harmônico, instabilidade de ganho, etc.

c) Projeto Mecânico - como instalar

- c1) dimensões - fixação, tampas Ex: (desenho cotado)
- c2) conexões - cablagem Ex: desenho, esquema
- c3) selagem - materiais, processo Ex: instruções
- cn) outros - normas de segurança (à prova d'água, à prova de explosão, segurança intrínseca, etc)

d) Desempenho - como funciona

- d1) estático - índices de desempenho em ambiente normal
  - d11) Sensibilidade média - Ex:  $0,65 \Omega/^{\circ}\text{C}$
  - d12) Deslocamento de zero - Ex:  $100 \Omega$
  - d13) Desvio de linearidade - Ex:  $0,05 \% \text{FSO}^1$
  - d14) Histerese - Ex:  $0,015 \% \text{FSO}$
  - d15) Não-repetibilidade - Ex:  $0,001 \% \text{FSO}$
  - d16) Curva teórica - Ex: tabela, gráfico
  - d17) Aproximação polinomial Ex: coeficientes
  - d18) Curva de desvio - Ex: linearid.(graf.)
  - d1n) outros - erro genérico ( $\pm \% \text{FSO}$ ), precisão, flutuação, resolução, limiar, etc.
- d2) dinâmico - desempenho em ambiente normal, com variação

---

<sup>1</sup>%FSO (Full Scale Output) - saída em percentual do Fundo de Escala

*rápida do mensurando*

*d21) Resposta em frequência - mantendo certo ganho*  
*Ex:  $\pm 3$  %FSO de 0 a 2000 Hz*

*d22) Constante de tempo - Ex: 1,2 ms*

*d23) Frequência natural - Ex: 7350 Hz*

*d3) ambiental - limites sem risco ao transdutor ou sua medida pelas condições ambientais, em operação ou forma-de-operação.*

*d31) Temperatura - Ex:  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$*

*d32) Aceleração - Ex:  $0,15 \text{ \%}/G_{\text{rms}}^2$*

*d33) Vibração - Ex: max.  $10 G_{\text{rms}}$*

*d34) Pressão - Ex: max. 3 atm*

*d3n) outros - efeitos de montagem, umidade, altitude, radiação, etc*

*d4) confiabilidade - perspectiva de funcionamento ótimo*

*d41) Vida armazenado - Ex: indefinida*

*d42) Vida útil - Ex:  $6 \times 10^{10}$  ciclos*

*d43) Tempo médio entre falhas -  $\text{MTBF}^3 = 6$  meses*

*d44) Tempo médio para reparar -  $\text{MTTR}^4 = 6$  h*

Destes itens, *a*, *b* e *c* são intrinsecamente uniformes, visto se tratar da especificação de um transdutor genérico. Desta forma, são as características de desempenho que se deve controlar individualmente nos transdutores.

Para a caracterização do desempenho de um transdutor, este deve ser ensaiado, em um processo que se denomina calibração, e testado de forma específica em relação a cada componente ambiental para a determinação da susceptibilidade do mesmo.

A calibração determina a resposta do transdutor a diversas intensidades de seu mensurando, e é realizada em duas formas - estática e dinâmica. Na calibração estática, o mensurando é

---

<sup>2</sup>G - Aceleração normal da gravidade ( $9,80665 \text{ m/s}^2$ )

<sup>3</sup>MTBF - Mean Time Between Failures

<sup>4</sup>MTTR - Mean Time To Repair



especificado do transdutor, e a saída do transdutor medida, constituindo estes dois valores pares coordenados, com os quais é construída uma curva de calibração. Na calibração dinâmica o mensurando é submetido a um estímulo periódico (p.ex. sinusoidal), com amplitude constante, e a frequência deste estímulo variada sobre uma faixa de interesse, registrando-se a amplitude da saída em relação a uma amplitude de patamar, determinada pelo processamento estatístico das amostras, como o valor de menor desvio padrão para uma coleção mínima das mesmas.

### 1.1 Calibração automática

A recente disponibilidade de microcontroladores oferece uma série de recursos para uso em instrumentação, que merecem ser analisados, com relação a uma série de procedimentos usualmente incômodos de tratar em ensaios de transdutores.

1.1.1 Estimulação monotônica<sup>5</sup> - A estimulação do transdutor deve progredir de forma monotônica durante um ensaio, porque devido a fenômenos como a histerese, a variável de saída depende do histórico da estimulação. Se em algum ponto da calibração a estimulação voltar a algum nível inferior, a retomada do valor se dá por outro caminho, invalidando o processo. Isso coloca certas restrições a dispositivos de calibração que necessitem ser desligados e rearranjados para a estimulação em outro nível (ou em outra faixa). Nestes casos, as consequências desses procedimentos sobre a validade do ensaio devem ser cuidadosamente avaliadas.

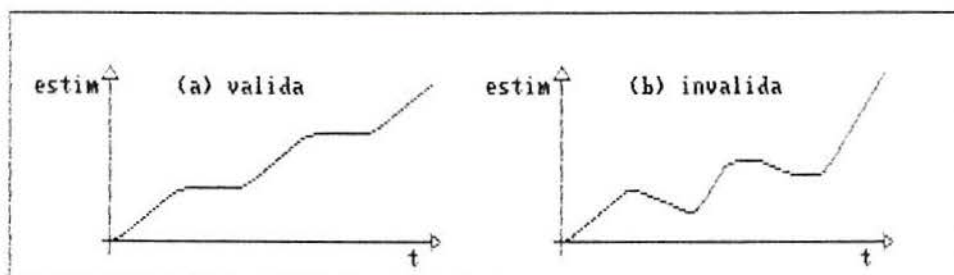


Fig 1.2 - Aplicação válida e inválida de estimulação variável

<sup>5</sup> Monotônica - curva que não inverte nunca o sinal da declividade

1.1.2 Ciclos múltiplos - O ensaio de amplitude deve ter 4 percursos na amplitude da estimulação, ou seja, 0%-100%-0%-100%-0%. Os percursos descendentes permitem o estabelecimento da histerese (diferença da saída para 2 pontos com o mesmo mensurando, na subida e na descida da estimulação). O segundo ciclo permite a comparação de trajetórias iguais da estimulação, para a determinação do desvio de repetibilidade de curto prazo.

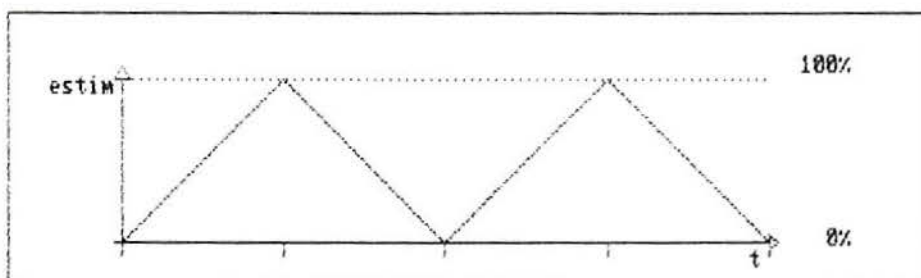


Fig 1.3 - Ciclos de calibração aplicam estimulação variando de 0 a 100% do valor nominal, em sequência

1.1.3 Extensão temporal do ensaio - dependendo do tipo de estimulação a ser imposta ao transdutor, a mudança dos valores da mesma pode ser extremamente lenta, devido a fatores como resposta do sistema, ou condições de estabilidade. A aplicação de pequenos passos de incremento em grande número, ao longo de grandes períodos representa um problema ao controle por operador humano.

Estes requisitos da aplicação da estimulação, adicionados à eventual necessidade de variação muito lenta da mesma, podem ser melhor satisfeitos com o auxílio de controladores digitais dedicados, que também adicionam certas características ao processo, como as que discutimos a seguir.

1.1.4 Amostragem discreta - Diferentemente de sistemas analógicos, que podem ter a saída diretamente ligada a registradores gráficos, fornecendo curvas analógicas contínuas de calibração, os sistemas

digitais (bem como sistemas analógicos rearranjáveis, que necessitam ser desligados, regulados e reativados entre cada nível de estímulo) resultam na medição de pontos discretos, pela aplicação de patamares de estimulação ao transdutor, com a coleta das saídas correspondentes. A partir daí, a graficação dos resultados deve seguir uma alternativa, como plotar apenas os pontos medidos, segmentos de reta unindo os pontos, patamares, ou curvas por interpolação, para a exibição. A Fig 1.4 ilustra algumas alternativas.

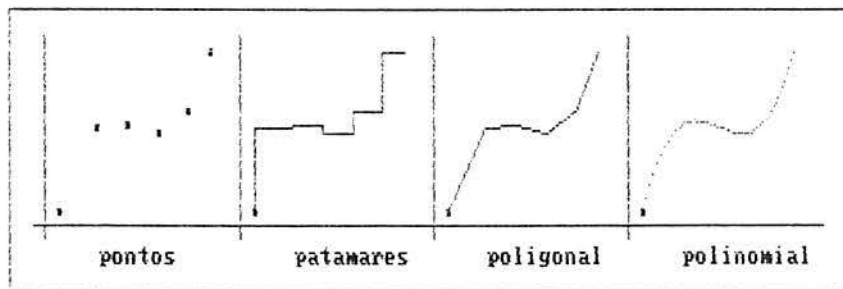


Fig 1.4 - Alternativas de graficação de uma amostragem

Este fato não representa necessariamente uma restrição indesejável ao registro de calibrações. A maior parte das calibrações necessita de processamento complementar dos dados para a determinação de índices, para o que se torna necessária a tabulação de leituras em pontos específicos, e desta forma, o registro gráfico direto de variáveis contínuas de calibração ficou relegado a traçados complementares, sem assistência da marcação de eixos e suas escalas, ou da identificação das curvas expostas.

1.1.5 Digitalização das medições - Além da discretização das amostragens, cada ponto a ser medido com o uso de microcontroladores tem de ser digitalizado para o processamento e apresentação. Este processo envolve um ruído intrínseco, que deve ser mantido menor do que a precisão dos componentes analógicos, de forma a não desmerecer o processo.

## 1.2 Saída impressa



## 1.2 Saída impressa

A partir da digitalização das entradas para o processamento digital, é coerente definir a graficação por dispositivos digitais, não incorrendo no ônus adicional de re-converter os dados à forma analógica. Destes dispositivos, o mais convencional é a impressora de agulhas, cujas capacidades gráficas permitem o traçado das curvas, aliado à identificação de pontos notáveis e índices por caracteres.

Diversamente de registradores gráficos e *plotters*, as impressoras têm um nível de padronização bem mais elevado. Os formulários de uso são, na sua grande maioria, do formato carta (8.5" x 11"), que podem ser impressos em 80 ou 140 colunas. Podem ser utilizadas graficamente, em várias densidades de plotagem (na densidade média, cerca de 800 *pixels*<sup>6</sup> na largura da página). Estes parâmetros conhecidos permitem um planejamento padronizado do campo de impressão para o registro impresso de um ensaio de calibração.

Uma utilidade secundária da saída digital do registro é que ela pode ser armazenada em dispositivos computacionais de memória permanente, ficando disponível para a extração de cópias adicionais, ou, se modularizado o registro, disponível para a inclusão das curvas no texto computadorizado de relatórios ou trabalhos posteriores, aos quais o registro seja interessante.

## 1.3 Sub-conjunto de desempenho

O ensaio de calibração fornece a rigor os itens d1 e d2 das características de desempenho listadas anteriormente, e portanto nos ateremos à proposição de seu registro. Já quanto ao item d3 (ambiental), frisamos que as condições normais devem ser citadas no registro, e que as susceptibilidades a grandezas outras que o mensurando devem ser objeto de ensaios específicos, sempre que relevantes ao uso do transdutor. O item d4 contém informação relativa a uma estatística sobre populações de transdutores, que deve ser executada por amostragem na fabricação, e por registro de

---

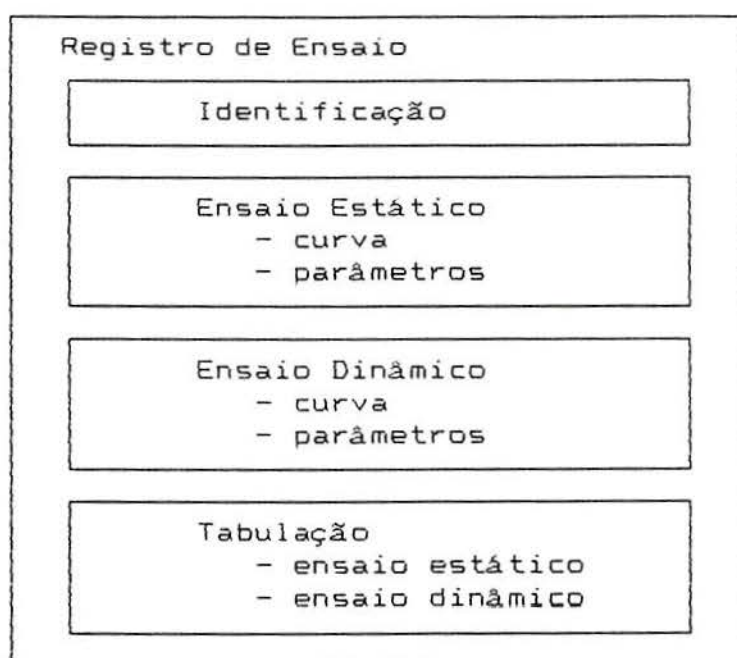
<sup>6</sup>*Pixel* - *Picture element*, menor ponto graficado por um dispositivo



ocorrências na manutenção dos transdutores, não sendo portanto tratados nessa abordagem de ensaio individual de calibração. Os itens d1 e d2 são detalhados a seguir.

## 2. Composição de um registro

O registro de ensaio de um transdutor aqui proposto tem a seguinte estrutura:



*Fig 2.1 - Organização de um registro de ensaio de calibração*

A identificação visa prover todas as informações referentes ao ensaio: a quem pertence o transdutor, quem executa o ensaio, quem fabricou o transdutor e que modelo e número de série o especificam.

O Ensaio Estático é feito pela variação da amplitude da estimulação, sob condições ambientais controladas (especificadas no registro). Ele contém uma parte gráfica (a curva), com a marcação adicional de pontos críticos, escalas e curvas de diferença, e uma parte literal, com a determinação de parâmetros do transdutor, como a sensibilidade, os erros de linearidade, histerese e repetibilidade, e um polinômio ajustado aos pontos medidos.

O Ensaio Dinâmico é executado pela aplicação de uma varredura de frequências de amplitude constante e a medição de amplitudes de resposta, ou pela aplicação de um degrau de amplitude, e verificação do tempo de resposta. Ambas opções são graficadas em uma curva com

escalas e marcação de pontos críticos, seguida por uma lista de parâmetros determinados, como as frequências de atenuação de 3 dB, ou o tempo de resposta a um degrau.

As tabulações são o material primário, tal como foi adquirido durante os ciclos de calibração, e acompanham o registro como documentação disponível para outros processamentos *a posteriori*.

### 3. Identificação

Os campos a seguir descritos integram o setor de identificação do registro de ensaio:

3.1 Título - identifica a folha, (p.ex., REGISTRO DE ENSAIO DE MANÔMETRO), definindo desde o início o conteúdo e o transdutor.

3.2 Do ensaio - particulariza e identifica este ensaio

- a) responsável - órgão que fornece o laudo de ensaio
- b) data - dia-mês-ano da realização do ensaio
- c) requisitante - o proprietário do transdutor
- d) número do ensaio - a codificação deste documento
- e) operador - a pessoa responsável pela condução
- f) cargo - atribuição funcional do operador

3.3 Do transdutor - especifica o transdutor em teste

- a) tipo - indica a tecnologia específica do componente
- b) fabricante - o produtor do componente
- c) modelo - a denominação de grupo pelo fabricante
- d) número-de-série - especifica o indivíduo

3.4 Dos equipamentos - relaciona os recursos que foram empregados para a realização da excitação e das medições

- a) nome - para cada equipamento usado no ensaio
- b) fabricante - do instrumento ou equipamento
- c) modelo - segundo o fabricante
- d) número de série - dado de placa do equipamento
- e) categoria de precisão - ex.: 0,5% / 1% / 2% / etc.

REGISTRO DE ENSAIO DE ACELEROMETRO				
Resp: IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS			Data: 12/06/91	
Requis: DTK - COM. REPRESENTACAO LTDA			Ensaio #: 29.284	
Oper.: Eng Ricardo V Amaral			Cargo: Ger. LABEDIV	
ACCELEROMETRO			Tipo: piezoeletrico	
Fabr: DIE TECHNIK	Mod.: AD-190		# Serie: 700.419785	
EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	Fabricante	Modelo	Num.de Serie	Prec.
Excitador Eletrodinamico	BRUEL & KJAER	4801/12	853475/524	
Amplificador Potencia	BRUEL & KJAER	2707	839232	
Gerador de Sinais	HEWLETT-PACKARD	3314A	2 836A10 752	
Acelerometro	BRUEL & KJAER	8305	1 483 331	1%
Amplificador de Carga	BRUEL & KJAER	2635	1 474 351	
Voltmetro Digital	BRUEL & KJAER	2432	1 353 529	0.1%
Analizador de Espectros	HEWLETT-PACKARD	3582A	1 909A00 212	0.5%
Registrador X-Y	HEWLETT-PACKARD	7046A	1 430A01 573	1%

Fig 3.1 - Exemplo de identificação de registro de ensaio de um transdutor

#### 4. Calibração estática

A calibração estática utiliza o procedimento de aplicar uma estimulação de frequência constante, ou então de frequência e amplitude de pico constantes, em uma varredura de amplitudes (na forma de uma rampa ou degraus), registrando as saídas correspondentes obtidas do transdutor, em 2 ciclos completos (1.1.1).

Na calibração digital automática, a série de coordenadas (estimulação, saída) obtidas será graficada em uma Curva de Calibração, processada para a determinação de índices de Desempenho, e finalmente tabulada como memória do ensaio.

Um exemplo do registro do ensaio estático pode ser visto na Fig 4.1.



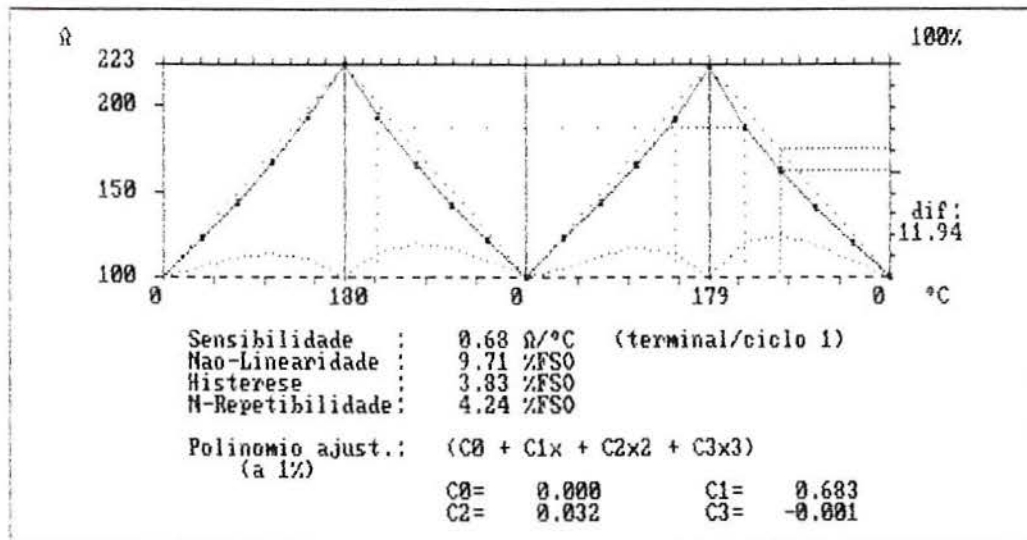


Fig 4.1 - Exemplo de registro de calibração estática -  
 Sensor térmico RTD tipo Ni100

#### 4.1 Graficação

A Curva de Calibração é a expressão mais sensível do comportamento geral do transdutor, ao primeiro exame visual. Entretanto, muitas curvas executadas em registradores gráficos ficam carentes da marcação de eixos, escalas nos eixos X ou Y. Outro procedimento muito comum é sobrepor os diversos ciclos em um mesmo quadro, onde as curvas se confundem e não se prestam a interpretações corretas.

O sistema aqui proposto desenrola o gráfico como que em sua sequência temporal, exibindo os ciclos lado-a-lado, destacando perfeitamente cada trecho do ensaio. Nesta forma, deve-se atentar para o fato do eixo dos mensurandos apresentar-se com orientações invertidas a cada percurso (0-100%, 100-0%). Os valores das grandezas de estimulação e de saída são registrados junto ao eixo X inferior e junto ao eixo Y esquerdo, com subdivisões automaticamente escaladas em fatores de 1, 2 ou 5. Nos eixos X superior e Y direito, subdivisões normalizadas 0%-100% são executadas para referência.

Para a continuidade da representação da Curva de Calibração (adquirida discretamente), traça-se uma poligonal unindo os pontos

dados pelos pares coordenados amostrados. A poligonal é escolhida por usar o mesmo modelo matemático da reta ideal entre os pontos finais do ensaio, que idealmente conteria todos os outros.

Os pontos críticos resultantes da determinação dos desvios (maior afastamento da reta ideal, maior histerese, maior afastamento da repetibilidade) são também marcados por linhas de cota.

#### 4.2 Reta Ideal, curva de diferenças e polinômio ajustado

4.2.1 Reta Ideal - A reta de referência (ideal) é escolhida entre pontos extremos do ensaio e plotada de forma pontilhada para comparação.

4.2.2 Curva de diferenças - Como os afastamentos da reta ideal podem ser difíceis de perceber na graficação geral, uma poligonal das diferenças é plotada pontilhada na região inferior, em módulo, com amplitude máxima escalada a 20% do Fundo de Escala (FSO). O valor pico da diferença é registrado à direita (p.e. "dif: 11.94").

4.2.3 Polinômio ajustado - o fornecimento de um polinômio (de ordem tão baixa quanto possível), que inclua os pontos amostrados dentro de uma faixa mínima de erro é uma característica muito útil ao projetista que vai utilizar um transdutor. Com o auxílio desse polinômio o transdutor pode ser linearizado por um circuito de compensação ou ainda pelo programa que adquire seus valores.

Como indicamos na seção 1, um transdutor ideal tem por modelo uma função como  $y = k \cdot g$ , o que representa uma reta passando pela origem, e  $k$  a sensibilidade estática, mas um transdutor real tem este modelo alterado por um conjunto de efeitos. Um dos efeitos mais típicos é o deslocamento de zero que podemos designar por  $k_0$ , e que leva a um modelo do tipo  $y = k_0 + k \cdot g$  para um transdutor real. Outros efeitos implicam em certa curvatura a partir da reta ideal. Como o modelo anterior é um polinômio, uma maneira natural de considerar curvaturas é a de aumentar o grau deste, pelo que se propõe

$$y(\mathcal{E}) = k_0 + k_1 \mathcal{E} + k_2 \mathcal{E}^2 + k_3 \mathcal{E}^3 \quad (4.1)$$

A partir de um conjunto de amostras  $(\mathcal{E}_i, y_i)$  obtidas no ensaio, um polinômio pode ser ajustado pelos Mínimos Quadrados, onde modelamos o afastamento total  $w$  por

$$w = \sum_{i=1}^n (k_0 + k_1 \mathcal{E}_i + k_2 \mathcal{E}_i^2 + k_3 \mathcal{E}_i^3 - y_i)^2 \quad (4.2)$$

onde o mínimo afastamento é dado por

$$\text{Min } w \Rightarrow \frac{\partial w}{\partial k_0} = \frac{\partial w}{\partial k_1} = \frac{\partial w}{\partial k_2} = \frac{\partial w}{\partial k_3} = 0 \quad (4.3)$$

As condições (4.3) desenvolvem um sistema de 4 equações para a obtenção de  $k_i$ , que tem a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} 1 & \Sigma \mathcal{E}_i & \Sigma \mathcal{E}_i^2 & \Sigma \mathcal{E}_i^3 \\ \Sigma \mathcal{E}_i & \Sigma \mathcal{E}_i^2 & \Sigma \mathcal{E}_i^3 & \Sigma \mathcal{E}_i^4 \\ \Sigma \mathcal{E}_i^2 & \Sigma \mathcal{E}_i^3 & \Sigma \mathcal{E}_i^4 & \Sigma \mathcal{E}_i^5 \\ \Sigma \mathcal{E}_i^3 & \Sigma \mathcal{E}_i^4 & \Sigma \mathcal{E}_i^5 & \Sigma \mathcal{E}_i^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_0 \\ k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma y_i \\ \Sigma y_i \mathcal{E}_i \\ \Sigma y_i \mathcal{E}_i^2 \\ \Sigma y_i \mathcal{E}_i^3 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

A resolução do sistema (4.4) é facilmente programável, utilizando a regra de Kramer e o método dos determinantes menores, para a obtenção dos coeficientes  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ . Este sistema entretanto só terá solução para conjuntos de pelo menos 4 amostras, definindo portanto a amostragem mínima.

### 4.3 Índices de desempenho

Índices são valores escalares que resumem uma característica do transdutor, em função de algum modelo adotado. Após o processamento dos pontos coletados, os seguintes índices são listados abaixo da graficação da curva:

4.3.1 Sensibilidade - (S) - a sensibilidade é a declividade de uma reta, e nesta proposta, a declividade da reta ideal do percurso ascendente do primeiro ciclo, acompanhada das unidades correspondentes - [Saída]/[Mensurando].

4.3.2 Não-linearidade - (NL) - representa o maior afastamento de uma amostra da reta ideal, exibido como percentual da Saída de Fundo-de-Escala (%FSO - Full-Scale Output).

4.3.3 Histerese - (H) - resume o maior afastamento entre a saída para um nível do mensurando no percurso ascendente e a saída para o mesmo nível de mensurando no percurso descendente, em %FSO.

4.3.4 Não-Repetibilidade - (NR) - informa o maior afastamento entre duas saídas para o mesmo nível de mensurando entre percursos similares de cada um dos ciclos do ensaio, em %FSO.



## 5. Calibração dinâmica

Na calibração dinâmica o transdutor é estimulado em uma amplitude fixa, no domínio tempo ou no domínio frequência.

O ensaio no domínio tempo consiste em aplicar um salto (degrau) da excitação, a partir de 0, e adquirir as leituras de saída ao longo do tempo, até que a declividade indique a proximidade do regime permanente, arbitrando

$$\left. \frac{\Delta y}{\Delta t} \right|_1 < \frac{1}{100} \left[ \frac{y_1 - y_0}{t_1 - t_0} \right] \quad (5.1)$$

São determinados a amplitude do primeiro *overshoot*<sup>7</sup>, a constante de tempo do sistema, e o tempo para desvio menor que 5%.

No domínio frequência, uma amplitude fixa é selecionada, e um número mínimo de 7 frequências, aplicadas sequencialmente em escala ascendente, com a leitura da amplitude de saída em cada caso. Uma amplitude de referência é calculada a partir das amplitudes medidas, tal que o menor desvio padrão seja conseguido para um conjunto de 3 amostras. A seguir são colecionadas todas as amostras em um entorno de 10% desta referência, e uma nova referência calculada pela amplitude média desta coleção. As frequências de afastamento de 3 dB desta referência são determinadas, bem como a faixa de 10% de desvio máximo (1,66 dB) deste patamar.

### 5.1 Graficação

Os pontos medidos são assinalados em um gráfico de escalas logarítmicas em ambos os eixos (divididos em dB e  $\log f$ ). A escala das magnitudes é centrada

em 0 dB (patamar), estendendo-se a mais ou a menos dentro da faixa medida. A escala das frequências progride em décadas ou em oitavas. Três efeitos básicos podem ser considerados - uma frequência de

---

<sup>7</sup>*Overshoot* - ultrapassagem do nível final de regime pelo sinal de saída

corte nas baixas, uma de corte nas altas e uma eventual ressonância, como na equação [DOE/90]

$$\frac{y_o}{g_i}(\omega) = k \times \frac{1}{\tau_1 \omega + 1} \times \frac{\tau_2 \omega}{\tau_2 \omega + 1} \times \frac{1}{\frac{\omega^2}{\omega_o^2} + \frac{2\xi \omega}{\omega_o} + 1} \quad (5.2)$$

Após a estimativa dos parâmetros característicos, uma curva pontilhada de interpretação é traçada, para auxílio à leitura. Esta curva tenta interpretar basicamente uma atenuação em baixas frequências e uma possível ressonância nas altas frequências, que será mais ou menos aproximada da realidade, na dependência do número de amostras tomado, daí ser tomada apenas como interpretação.

## 5.2 Frequências características

São marcadas a frequência inferior de 3 dB e as duas frequências da faixa de  $\pm 1,66$  dB, além da eventual frequência de ressonância.

O gráfico da Fig 4.2 mostra um exemplo de graficação de ensaio dinâmico no domínio frequência.

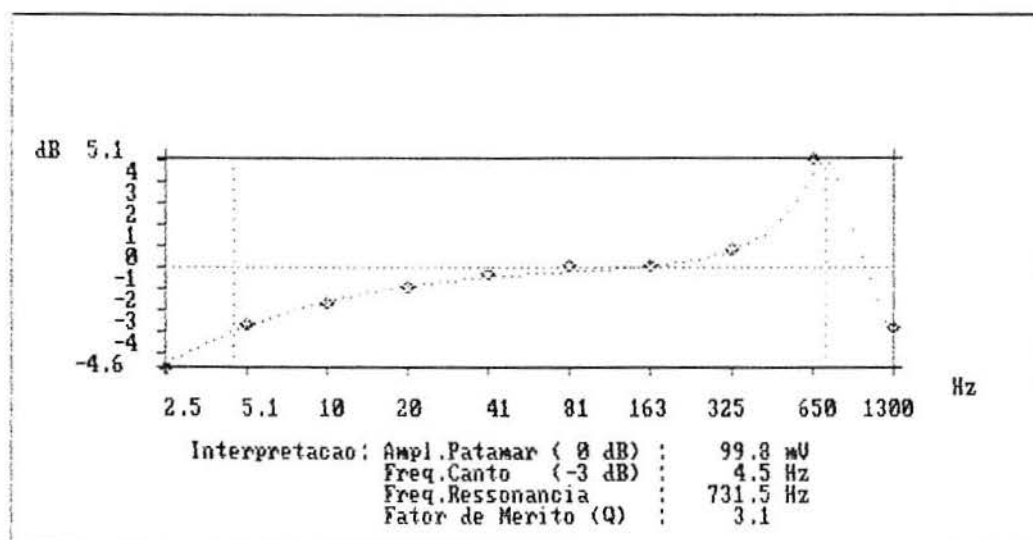


Fig 4.2 - Ensaio de acelerômetro no domínio frequência

## 6. Tabulação de medidas

A tabela de medidas adquiridas durante os dois ensaios é impressa como memória de cálculo, o que permite a aplicação de processamentos posteriores aos mesmos, quando outras situações o sugerirem. Os valores devem ser impressos em formato hábil para a recuperação por planilhas eletrônicas e outros sistemas, portanto com ponto decimal. As escalas e dígitos significativos devem ser mantidos dentro da precisão da aquisição dos dados.

---

+0.00	+100.	+39.0	+124.	+73.0	+144.	+100.	+167.
+144.	+193.	+180.	+223.	+147.	+193.	+109.	+165.
+73.7	+142.	+39.1	+122.	+200.E-03	+100.	+36.9	+123.
+73.4	+144.	+103.	+165.	+146.	+193.	+179.	+223.
+144.	+188.	+109.	+163.	+73.3	+141.	+37.0	+121.
+0.00	+100.						
+2.50	+33.8	+5.10	+52.4	+10.2	+70.2	+20.3	+87.2
+40.6	+92.5	+81.3	+100.	+163.	+110.	+325.	+122.
+650.	+281.	+1.30E+03	+62.0				

---

*Fig 6.1 - Tabulação das amostras dos registros de ensaio estático e dinâmico*

## 7. Conclusões

É certamente possível estabelecer uma composição bastante padronizada para o registro do ensaio de transdutores. A estruturação do registro de calibração ao mesmo tempo organiza as informações em grupos afins (Identificação, Ensaio Estático, Ensaio Dinâmico, Tabulação), como também obriga a presença de um conjunto mínimo de informações (que muitas vezes poderiam ser omitidas) e ainda permite a utilização de uma folha única principal de registro, densa em informação mas de fácil leitura. Esta forma de apresentação facilita a comparação de transdutores entre si, mesmo que de diferentes grandezas primárias.

A automação dos equipamentos em um sistema de calibração viabiliza a execução de ensaios por excelência demorados, além de

permitir o processamento imediato dos valores adquiridos e expressão mais exata do registro de calibração, como

- a) marcação de eixos, escalas e pontos especiais
- b) expressão de índices de desempenho padrão
- c) produção de dados para entrada automática em outros sistemas

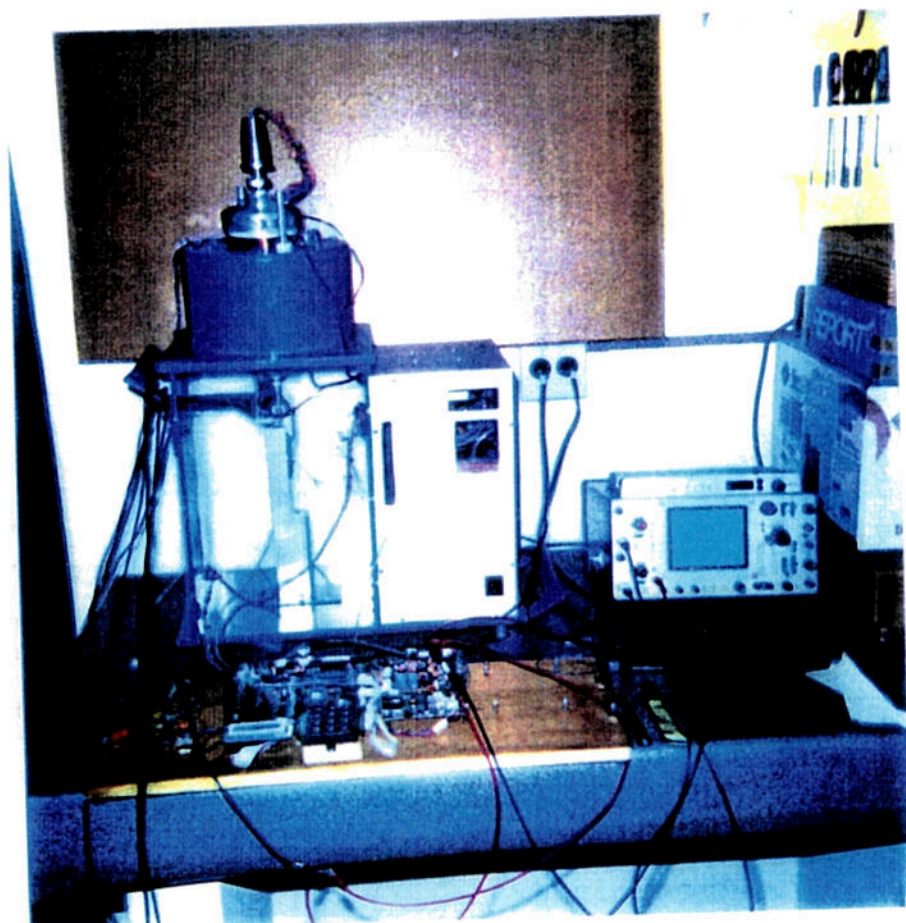
A utilização de tais sistemas pode conduzir ao uso de uma abordagem universal para o tratamento de transdutores como uma família de componentes de funções teoricamente similares, adicionadas de peculiaridades de constituição e funcionamento.

## 8. Bibliografia

- [ALL/84] ALLOCA, J.A.; STUART, A. Transducers - Theory and Applications. Reston Publishing Co. / Prentice-Hall Co., USA, 1984.
- [CLO/75] CLOSE, C.M.; Circuitos Lineares. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., São Paulo / BR, 1975.
- [DAL/83] DALLY, J.W.; RILEY, W.F.; McCONNEL, K.G.; Instrumentation for Engineering Measurements. John Wiley & Sons, Inc., N.York/USA, 1983.
- [DOE/90] DOEBELIN, E.O.; Measurement Systems - Application and Design. 4th.Ed. McGraw-Hill Publishing Co., N.York/USA, 1990.
- [NORN/82] NORTON, H.N.; Sensor and Analyser Handbook. Prentice-Hall Co., Englewood Cliffs/USA, 1982.
- [OLI/71] OLIVER, F.J.; Practical Instrumentation Transducers. Hayden Book Co.Inc., N.York/USA, 1983.



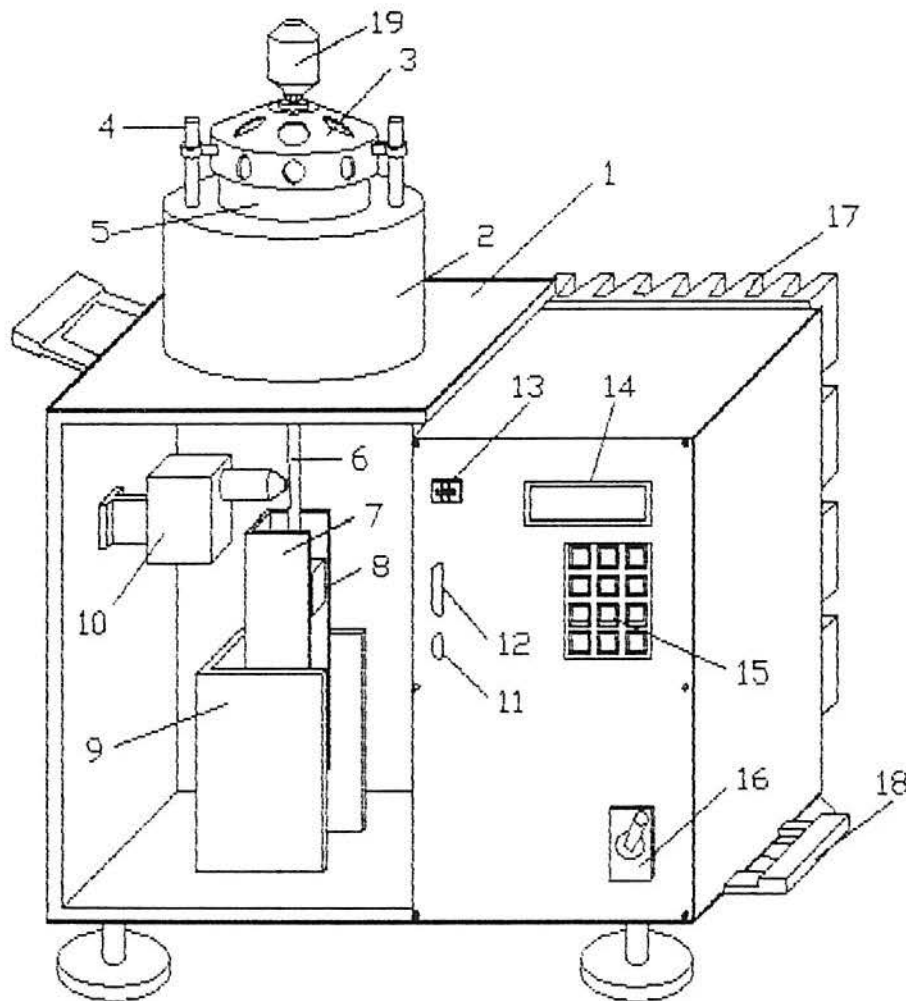
# **Anexos**



a1 - Equipamento CTV na Bancada de Testes

CTV

## Descricao do Conjunto



- 1- Gabinete
- 2- Conjunto magnetico
- 3- Flange conico
- 4- Pinos de guia
- 5- Voice-coil
- 6- Haste do encoder
- 7- Estojo da regua optica
- 8- Cursor do encoder
- 9- Suporte de alinhamento da regua
- 10- Proximeter
- 11- Conector RS-232
- 12- Conector para impressora de plotagem
- 13- Conector para acelerometro
- 14- Display LCD
- 15- Teclado
- 16- Chave principal
- 17- Dissipadores do amplificador
- 18- Alcas para transporte
- 19- Acelerometro em teste

CTV - CALIBRADOR PARA  
TRANSDUTORES DE VIBRACAO

Gabinete e partes principais

[CTV\_GAB.DWG]

UFRGS - PPGEMM  
INSTRUMENTACAO ELETRO-ELETRONICA

Edson Schuler

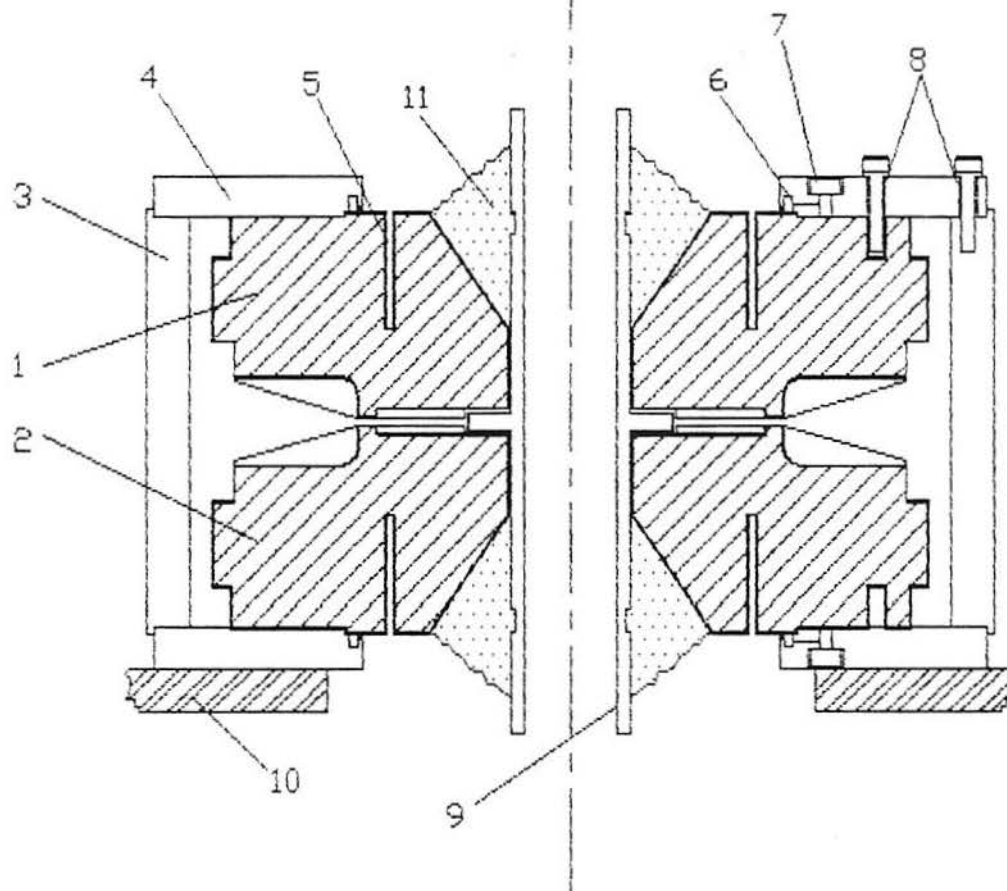
ESCALA 1:5

1996

a1-1

- 1- Nucleo magnetico A
- 2- Nucleo magnetico B
- 3- Cilindro espaciador
- 4- Placa de contencao
- 5- Entreferro

- 6- Canal de arrefecimento
- 7- Bocal de tomada de ar
- 8- Parafusos de fixacao
- 9- Bucha de Nylon retificada
- 10- Tampa do gabinete
- 11- Massa epoxi de fixacao



OBS: 1) Os nucleos magneticos nao estao detalhados na sua estrutura interna

2) Os parafusos sao mostrados em uma situacao, e colocados em todas as posicoes simetricas restantes

CTV - CALIBRADOR PARA  
TRANSDUTORES DE VIBRACAO

Conjunto Fixo da Mesa Vibratoria

{CTV\_CNJ.DWG}

UFRGS - PPGEMM  
INSTRUMENTACAO ELETRO-ELETRONICA

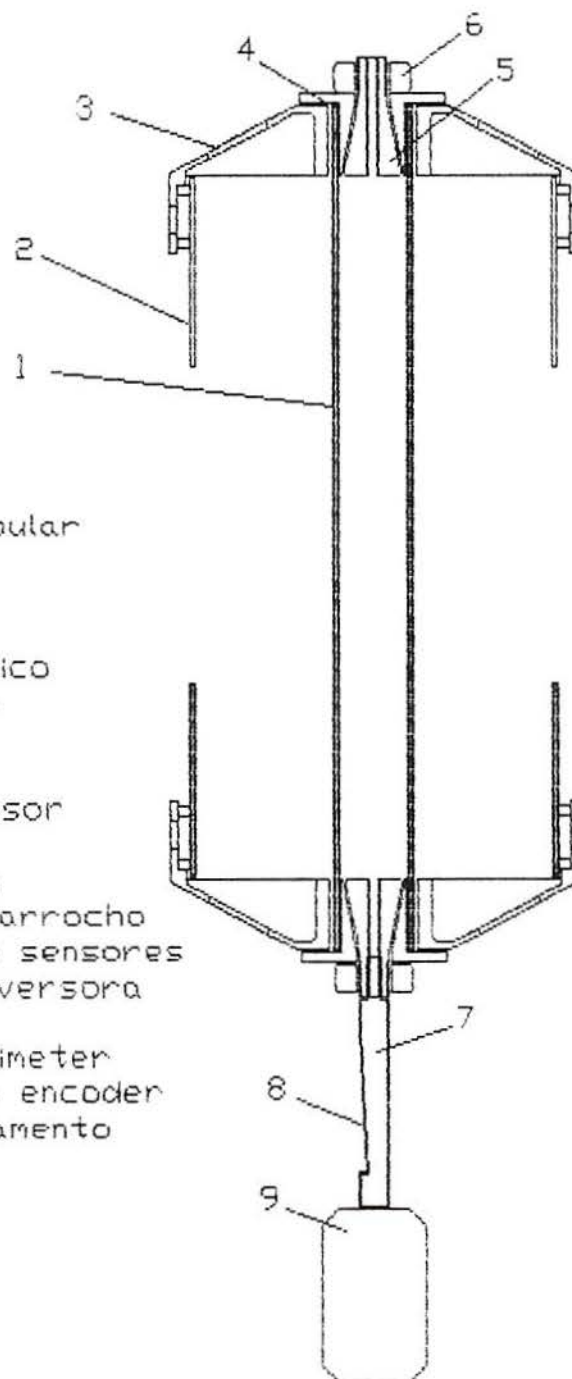
Edson Schuler

ESCALA 1:2

1996

a1-2





- 1- Embolo tubular de Zircal retificado
- 2- Voice-coil
- 3- Flange conico de aluminio
- 4- Bucha de expansao
- 5- Pivo expansor com furo rosqueado
- 6- Porca de anrocho
- 7- Haste dos sensores
- 8- Rampa conversora de altura para proximeter
- 9- Cursor do encoden de deslocamento

CTV - CALIBRADOR PARA  
TRANSDUTORES DE VIBRACAO

Conjunto movel da Mesa Vibratoria

[CTV\_MES.DWG]

UFRGS - PPGEMM  
INSTRUMENTACAO ELETRO-ELETRONICA

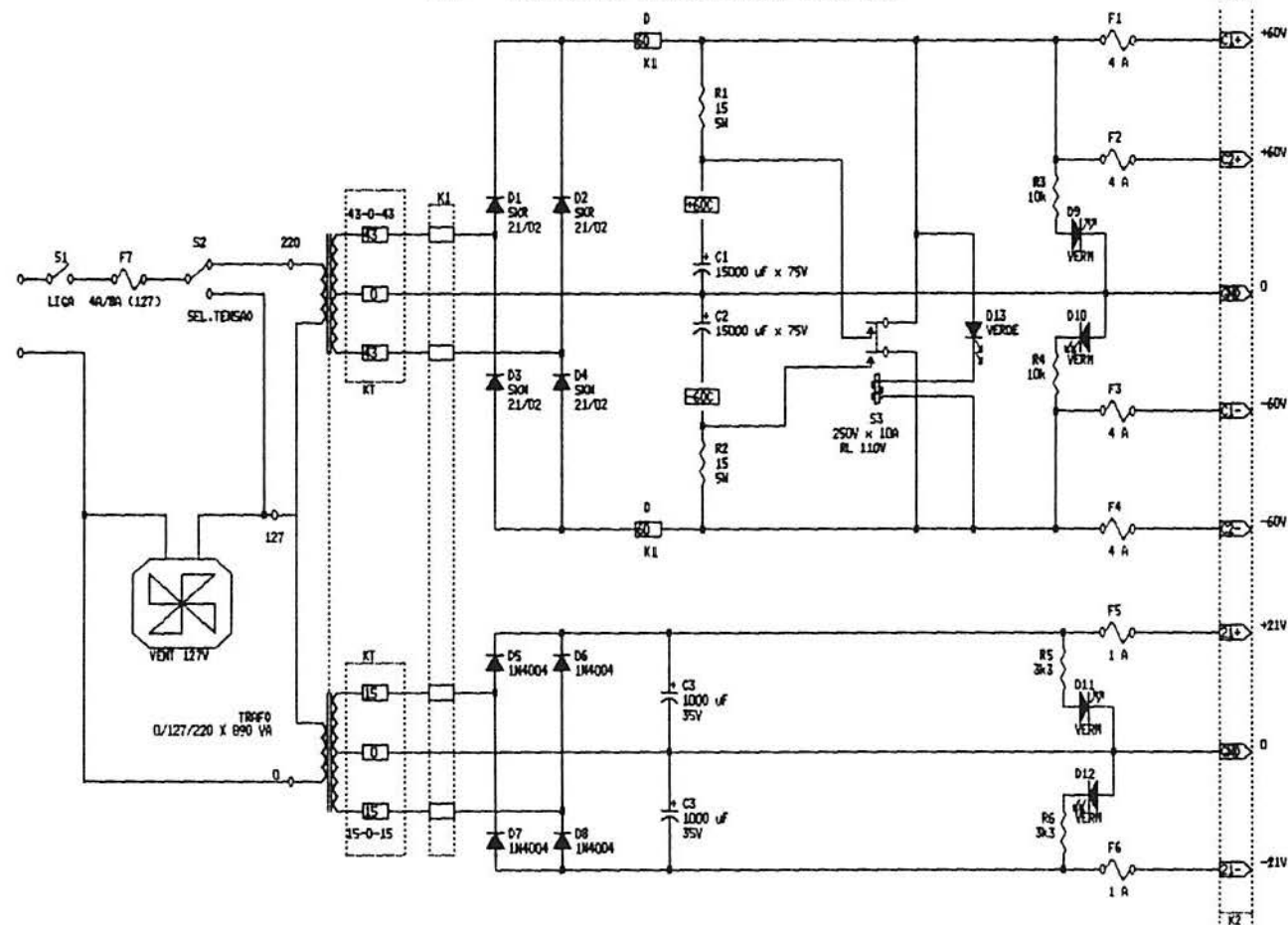
Edson Schuler

ESCALA 1:2

1996

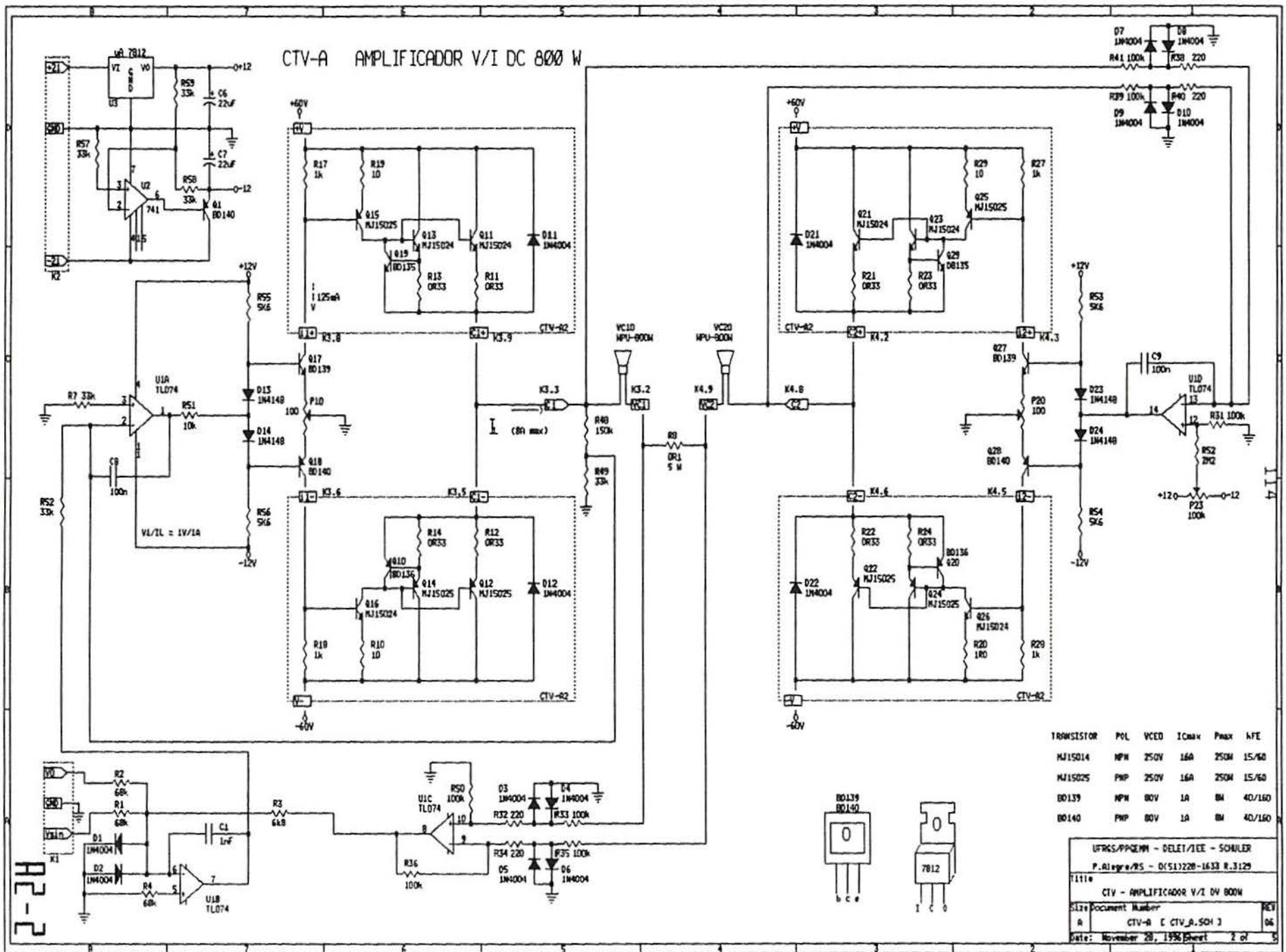
a1-3

# CTV - FONTES DE ALIMENTACAO (890 VA)



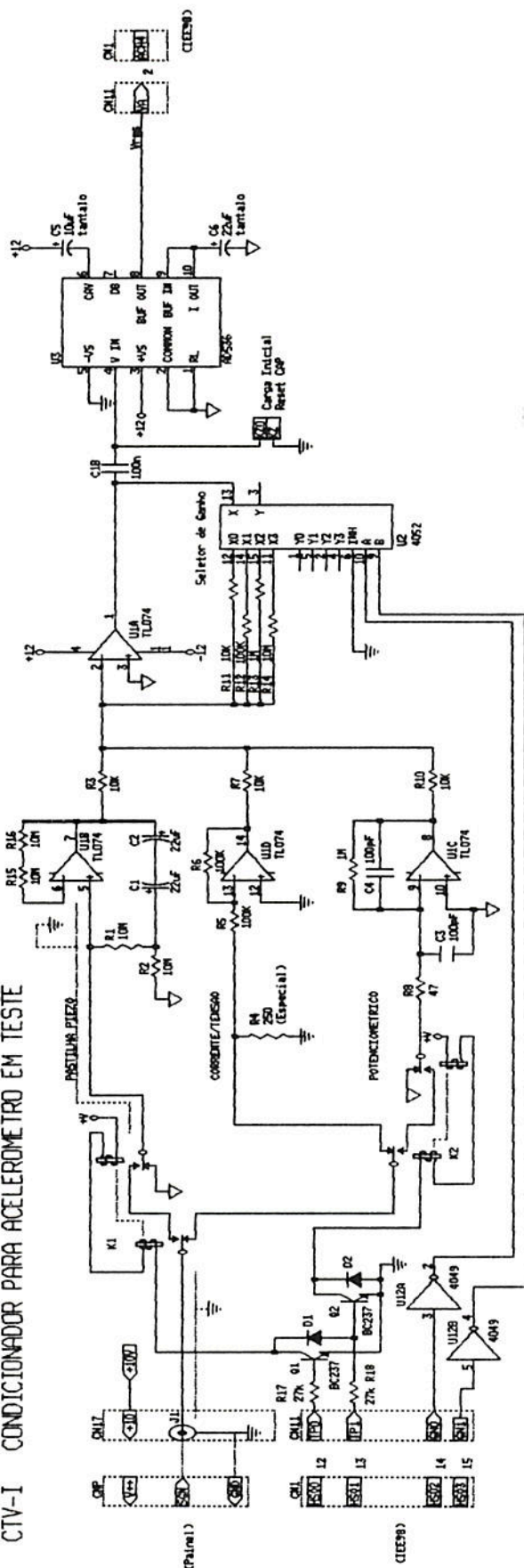
R2-1

UFRGS/PPGEMM - DELET/IEE - SCHULER	
P. Alegre/RS - 0151228-1633 R.3129	
Title	
CTV - FONTES DE ALIMENTACAO	
Size Document Number	
A CTV-F C CTV_FNT.SCH	
Date: November 28, 1998	Sheet 1 of 5

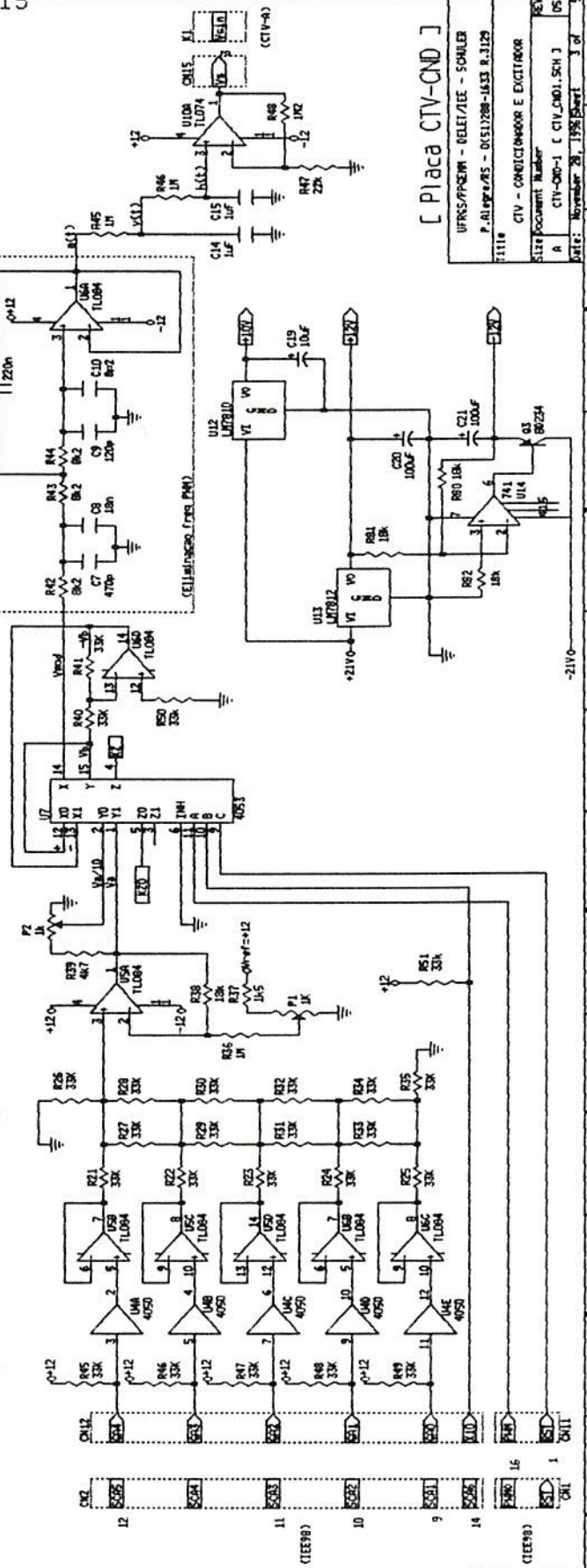




# CTV-I CONDICIONADOR PARA ACEROMETRO EM TESTE



# CTV-ME / CTV-PB CONVERSOR D/A, MODULADOR PWM E FILTRO P/EXCITACAO SINUSOIDAL

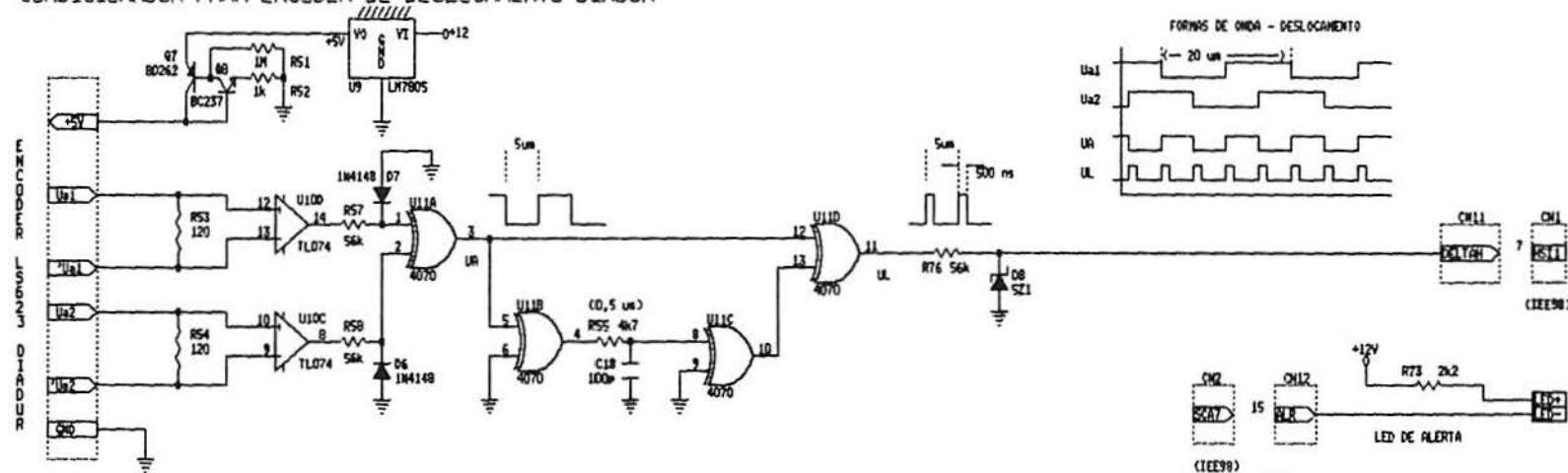


[ Placa CTV-OND ]

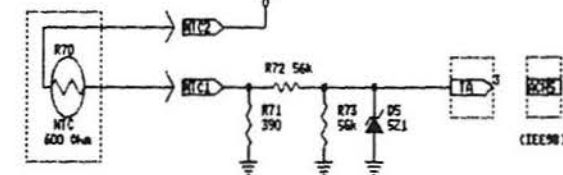
UFRRS/PPR/RS - RELET/EE - SOHLER  
P. Alegre/RS - 05/12/88-10/33 R.3.129  
CTV - CONDICIONADOR E EXCITADOR  
CTV-OND-1 ( CTV-OND1.SCH )  
Rev. 1  
Data: Novembro 28, 1988 Sheet 3 of 5



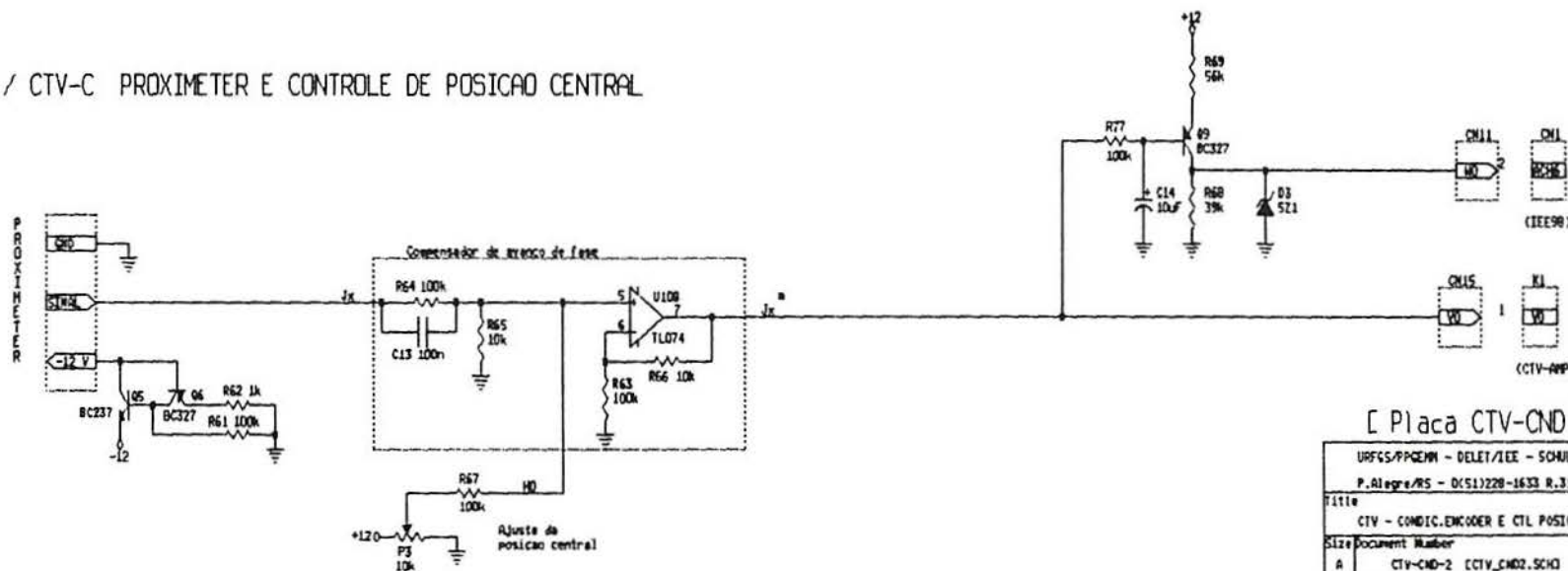
# CTV-E CONDICIONADOR PARA ENCODER DE DESLOCAMENTO DIADUR



## CTV-E AMOSTRAGEM DE TEMPERATURA DA MESA



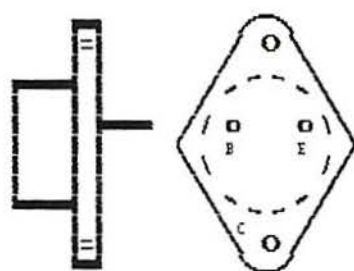
## CTV-P / CTV-C PROXIMETER E CONTROLE DE POSICAO CENTRAL



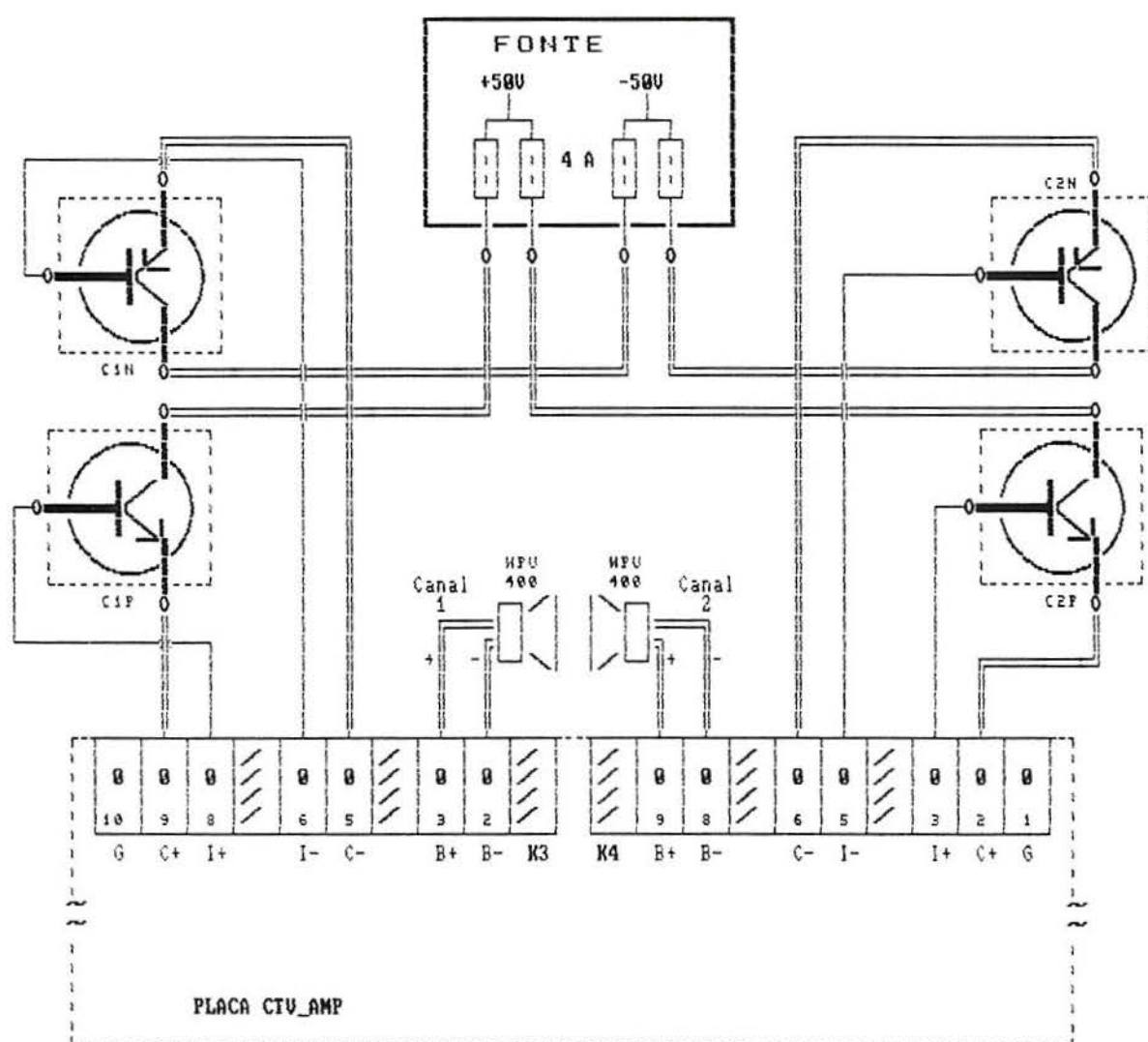
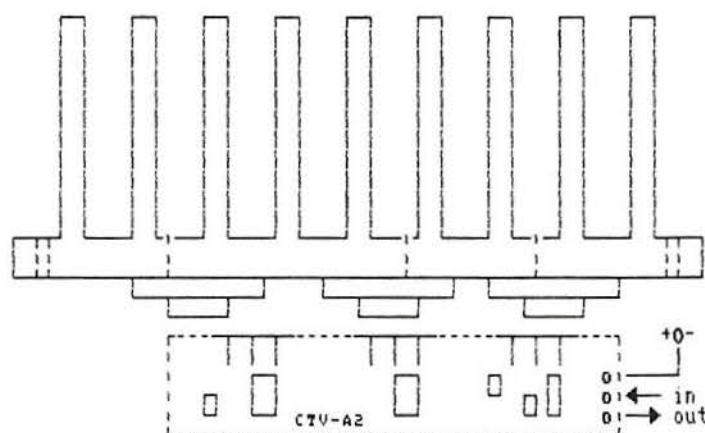
[ Placa CTV-CND ]

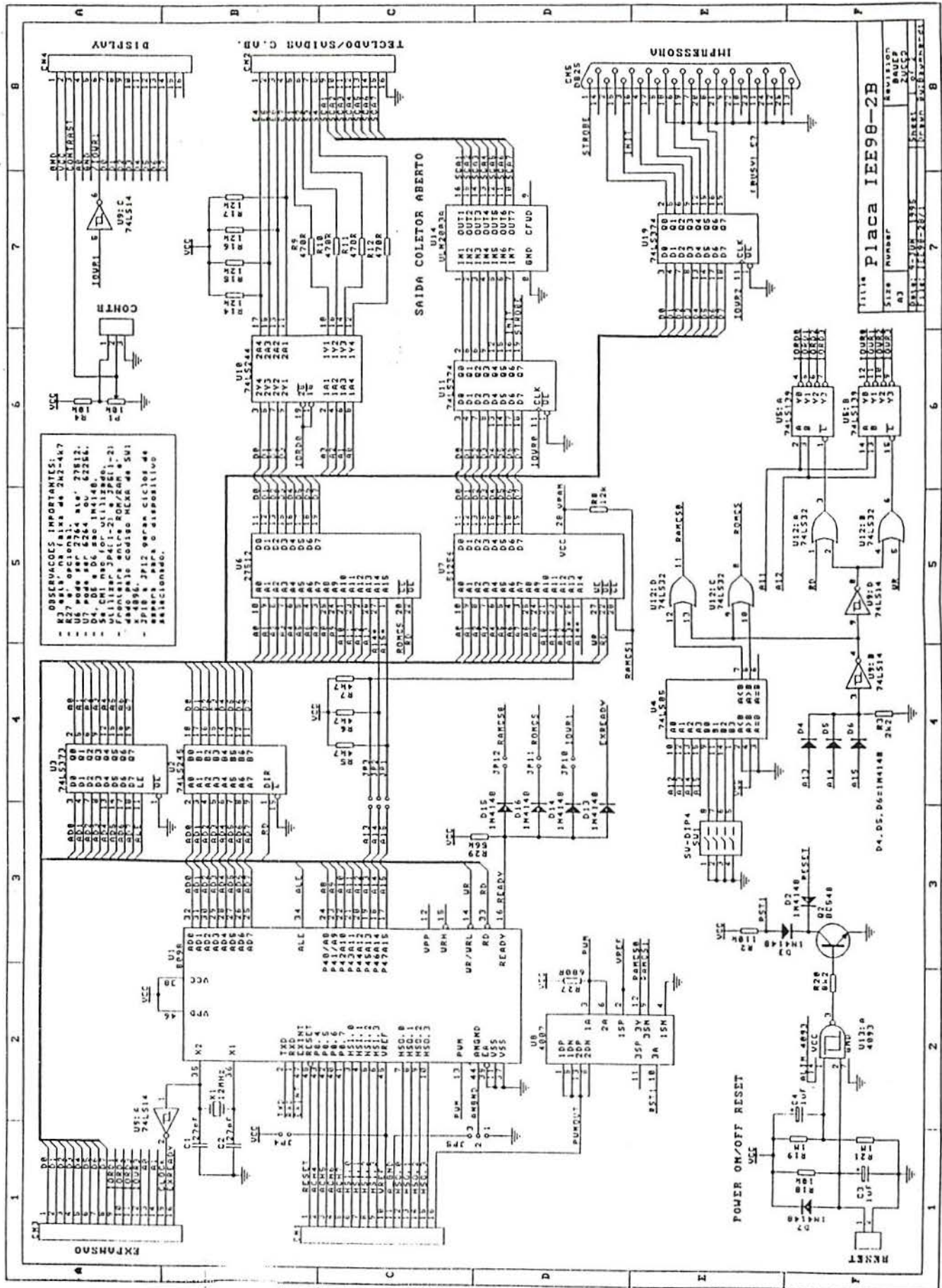
URFCS/PPGEMM - DELET/LEE - SCHULER	
P. Alegre/RS - 0511228-1633 R.3129	
Title	CTV - CONDIC. ENCODER E CTL POSICAO
Size Document Number	CTV-CND-2 (CTV_CND2.SCH)
Date: November 28, 1996	Sheet 4 of 5

RE-4

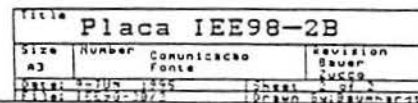


MJ15024 (NPN)  
MJ15025 (PNP)











## KT - Transformador

Tipo: Sindal

BORNE	LIGA EM	DESCRICAO
*0	chicote	Entrada de alimentacao AC - condutor comum
127	chw sel	Entrada AC p/127 V ( 7A ) - Ligacao ventoinha
220	chw sel	Entrada AC p/220 V ( 4A )
43	PONTE	Saida 43 V potencia ( 9A )
0	K1/CTV-F	Comum de potencia - (Amplificador)
43	PONTE	Saida 43 V potencia ( 9A )
15	K1/CTV-F	Saida 15 V geral ( 2A )
0	K1/CTV-F	Comum da saida geral - (Amplif/Condic/IEE98)
15	K1/CTV-F	Saida 15 V geral ( 2A )

## K1 - CTU-F

Tipo: Sindal

BORNE	LIGA EM	DESCRICAO
C+	CAP pot	Conexao retificada ao capacitor de filtragem de 15000µF
D+	PONTE	Anodo dos retificadores SKR
D-	PONTE	Catodo dos retificadores SKM
C-	CAP pot	Conexao retificada ao capacitor de filtragem de 15000µF
GND POT	KT	Comum de potencia (*0/K1 e centro dos CAP de potencia)
GND GER	KT	Comum geral (ligar ao de potencia)
AC21-A	KT	Ao 43 V geral
AC21-B	KT	Ao 43 V geral

## K2 - CTU-F

Tipo: Sindal

BORNE	LIGA EM	DESCRICAO
+60	CTU-A2	Saida filtrada +60V ( 4A ) p/amplificador Canal 1+
+60	CTU-A2	Saida filtrada +60V ( 4A ) p/amplificador Canal 2+
-60	CTU-A2	Saida filtrada -60V ( 4A ) p/amplificador Canal 1-
-60	CTU-A2	Saida filtrada -60V ( 4A ) p/amplificador Canal 2-
GND POT	CTU-AMP	Terra do sistema
GND GER	GND POT	Terra geral - interligado ao de potencia
+21	varios	Saida filtrada +21V ( 2A ) a CTU-AMP/CTU-CND/IEE98
-21	varios	Saida filtrada -21V ( 2A ) CTU-AMP/CTU-CND/IEE98

K1 - CTU-AMP  
CN15 - CTU-CND

Tipo: KRE  
Tipo: KRE

BORNE	LIGA EM	DESCRICAO
U0 GND Usin	CN15 * CN15	Sinal de controle de posicao central da mesa So' usado para aterrar malhas se U0/Usin as tiverem Sinal sinusoidal de excitacao da mesa vibratoria

K2 - CTU-AMP

Tipo: KRE

BORNE	LIGA EM	DESCRICAO
+21 GND -21	CTU-F CTU-F CTU-F	Alimentacao da placa do amplificador (sinal) Comum, interligar c/GND POT Alimentacao da placa do amplificador (sinal)

K3 - CTU-AMP

Tipo: KRE

BORNE	LIGA EM	DESCRICAO
1		----
2	U.COIL-1	Voice Coil NEG / Canal 1
3	U.COIL-1	Voice Coil POS / Canal 1
4		----
5	CTU-A2	C1- / Emissor do PULL-DOWN do Canal 1
6	CTU-A2	I1- / Entrada de controle do PULL-DOWN do Canal 1
7		----
8	CTU-A2	I1+ / Entrada de controle do PULL-UP do Canal 1
9	CTU-A2	C1+ / Emissor do PULL-UP do Canal 1
10		Terra de protecao para malhas de cabos

K4 - CTU-AMP

Tipo: KRE

BORNE	LIGA EM	DESCRICAO
1		Terra de protecao para malhas de cabos
2	CTU-A2	C2+ / Emissor do PULL-UP do Canal 2
3	CTU-A2	I2+ / Entrada de controle do PULL-UP do Canal 2
4		----
5	CTU-A2	I2- / Entrada de controle do PULL-DOWN do Canal 2
6	CTU-A2	C2- / Emissor do PULL-DOWN do Canal 2
7		----
8	U.COIL-2	Voice Coil NEG / Canal 2
9	U.COIL-2	Voice Coil POS / Canal 2
10		----

CTU\_CN2.CHT

CTU - Descricao de Conectores

a3-2

CN17 - CTU-CND  
CNP - painel

Tipo: KRE  
Tipo: KRE

BORNE	LIGA EM	DESCRICAO
+10 SGN GND	V++ SGN GND	Tensao de referencia para acelerometro em teste Sinal de saida do acelerometro em teste Comum de potencial e aterramento para malha de cabo

CN1A - CTU-CND  
K2 - CTU-F

Tipo: KRE

BORNE	LIGA EM	DESCRICAO
+21 GND -21	K2 K2 K2	Alimentacao, +21V terra Alimentacao, -21V

CN11 - CTU-CND  
CN1 - IEE98

Tipo: Flat 16 vias  
Tipo: Flat 16 vias

BORNE	LIGA EM	DESCRICAO
1	RESET	Inicializacao, carga inicial de C18 (CTU-I)
2	ACH4	Sinal do acelerometro, convertido a DC (true RMS)
3	ACH5	Sinal de temperatura, tensao sobre NTC
4	ACH6	Tensao W0, proporcional ao peso da mesa
5	AHC7	
6	HSI.0	
7	HSI.1	Pulsos de 5µm do encoder, sensor desloc. (T2CLK)
8	HSI.2	
9	HSI.3	
10	UREF	
11	A GND	
12	HSO.0	IP0 - Seletor tipo de condicionamento
13	HSO.1	IP1 - a usar (Pastilha/0-10V/0-20mA/Potenciom.)
14	HSO.2	GN0 - Seletor de ganho na entrada
15	HSO.3	GN1 - (x1, x10, x100, x1000)
16	PWM	w - frequencia da senoide a sintetizar

CN2 - IEE98  
CN12 - CTU-CND

Tipo: Flat 16 vias  
Tipo: Flat 16 vias

BORNE	LIGA EM	DESCRICAO	
1	E4	Entradas p/leitura teclado matricial ate' 16 teclas	T E C L A D O
2	E5	"	
3	E6	"	
4	E7	"	
5	S1	Saida para varredura de teclado matricial	
6	S2	"	
7	S3	"	
8	S4	"	
9	SCA1	GA0 \	
10	SCA2	GA1	
11	SCA3	GA2	Seletor de intensidade da vibracao (em G)
12	SCA4	GA3	
13	SCA5	GA4 /	
14	SCA6	x10	Seletor de ganho x10
15	SCA7		
16	GND		

CN13 - CTU-CND

Tipo: KRE

BORNE	LIGA EM	DESCRICAO
1	+5V	Alimentacao para Encoder Diadur
2	Ua1	Saida + RS-422 pulso de 20µm
3	'Ua1	Saida - RS-422 pulso de 20µm
4	Ua2	Saida + RS-422 pulso de 20µm deslocado de 5µm de Ua1
5	'Ua2	Saida - RS-422 pulso de 20µm deslocado de 5µm de Ua1
6	GND	Terra

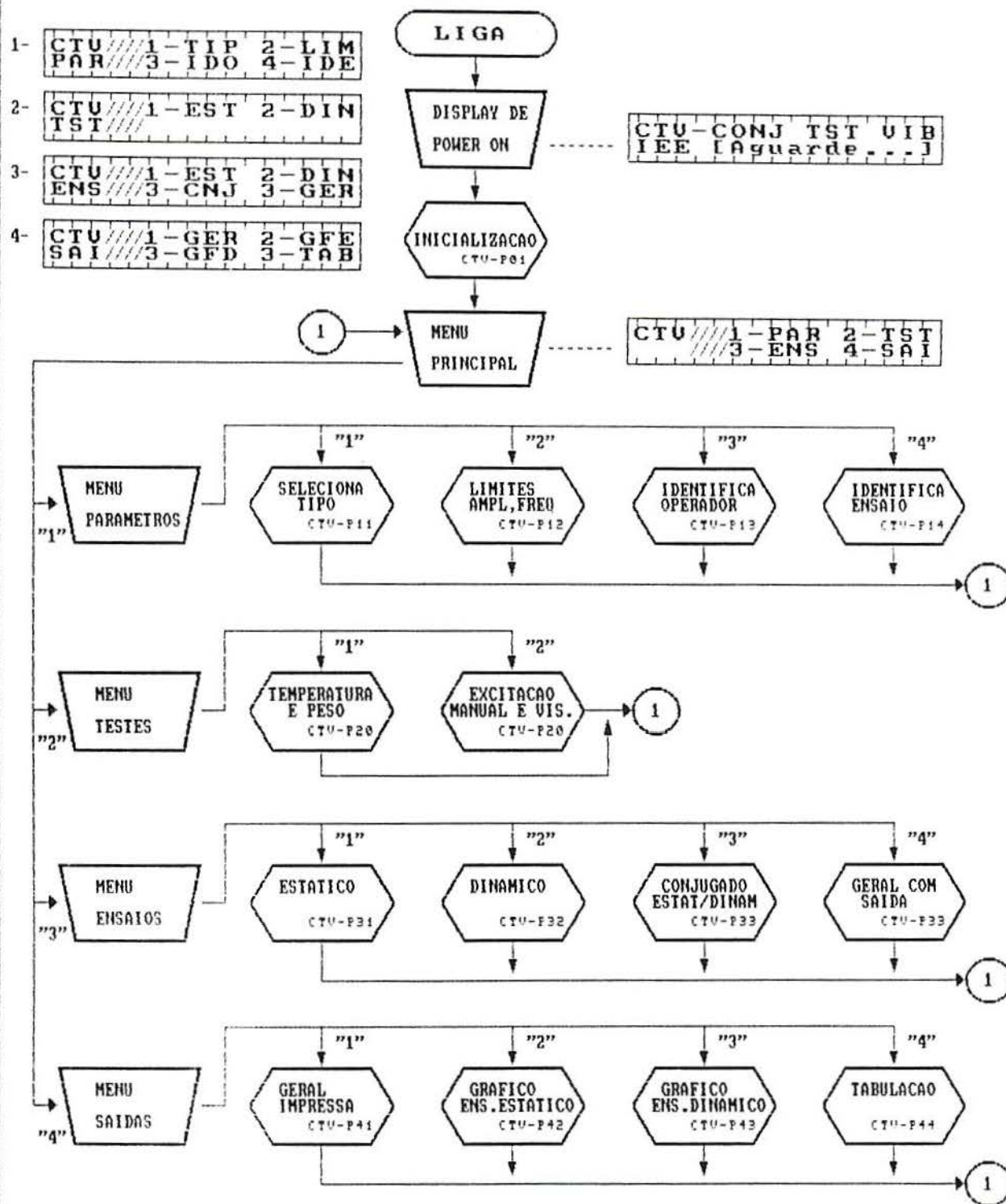
CN14 - CTK-AND

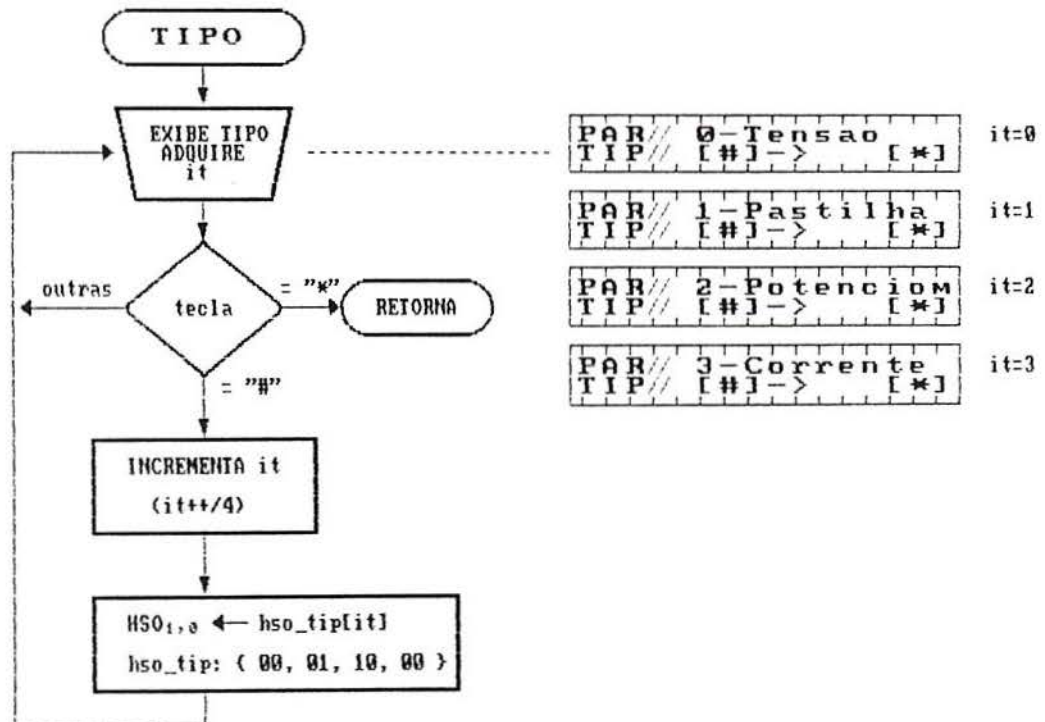
Tipo: KRE

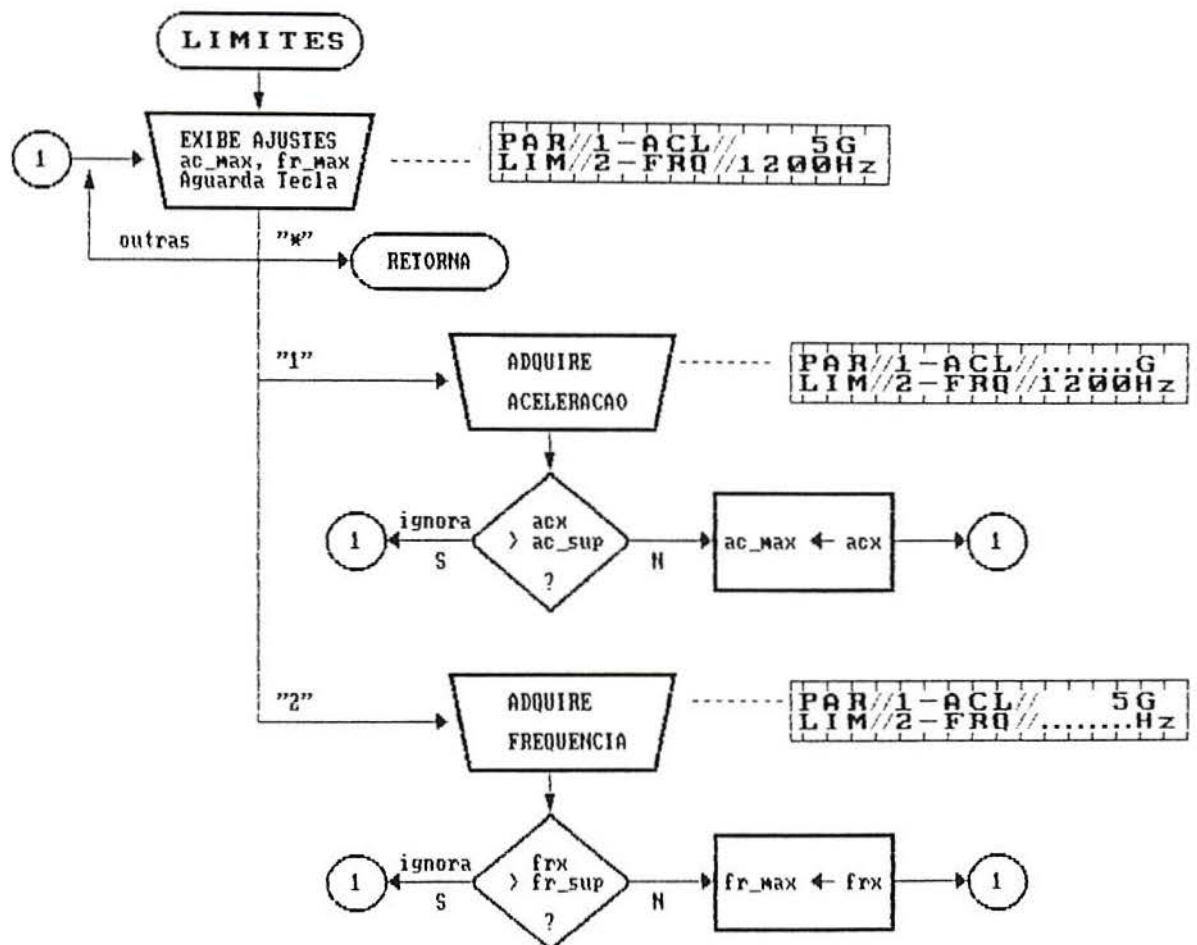
BORNE	LIGA EM	DESCRICAO
GND		Terra de referencia p/proximeter
SINAL		Tensao de saida de proximidade
-12V		Alimentacao p/proximeter

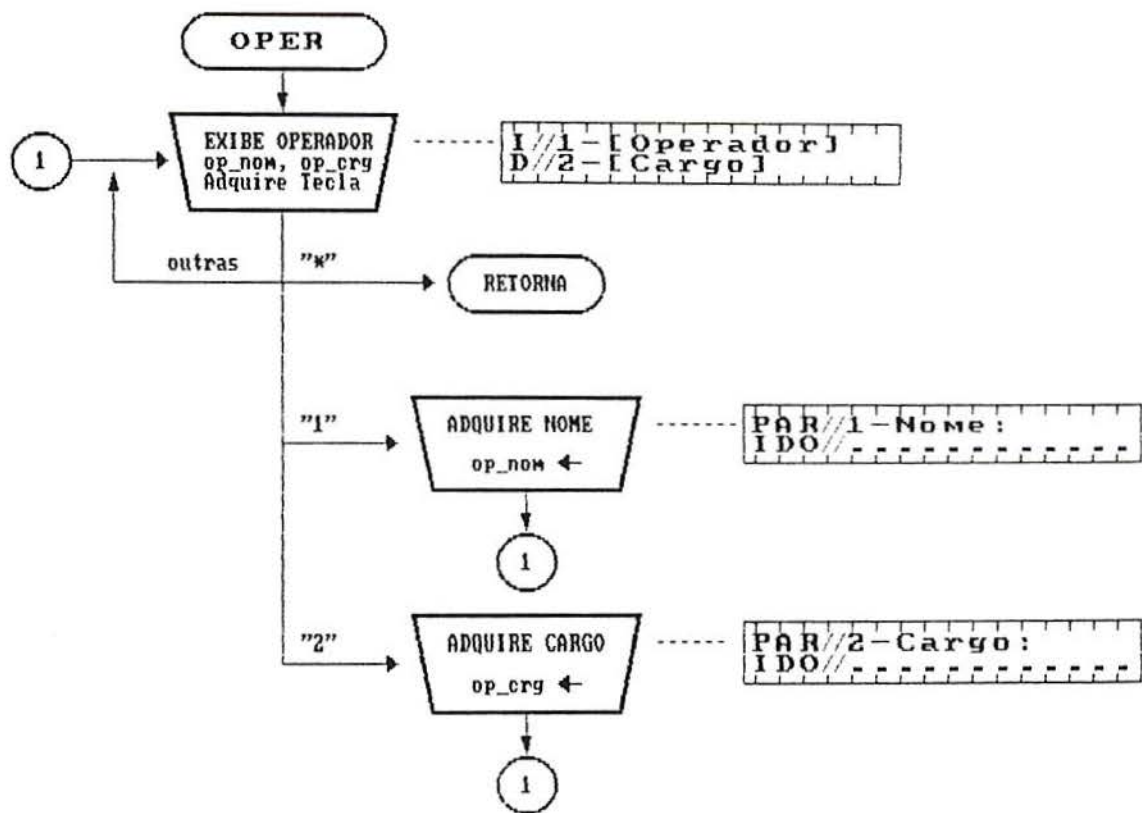


## CTV - GERAL

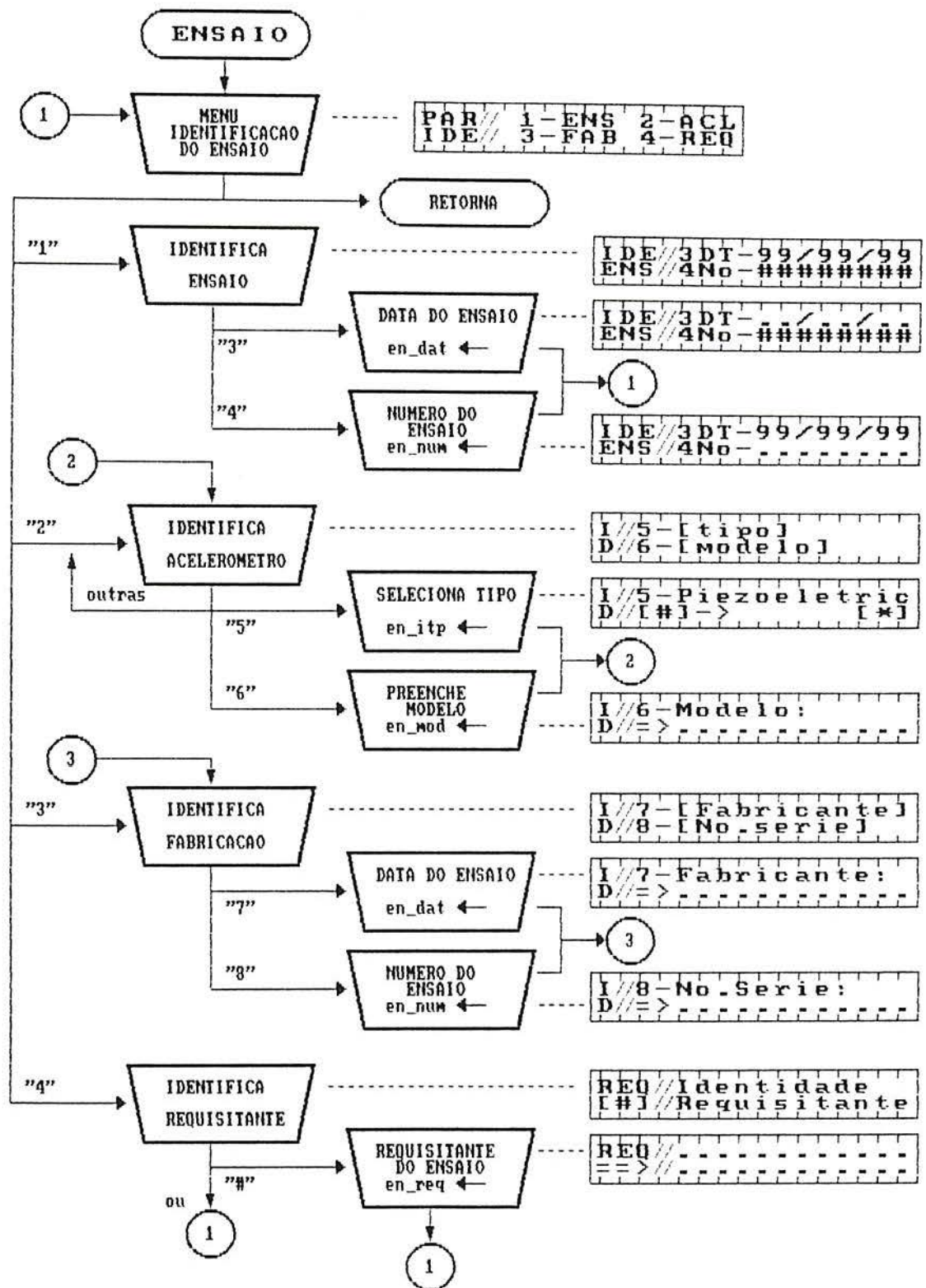


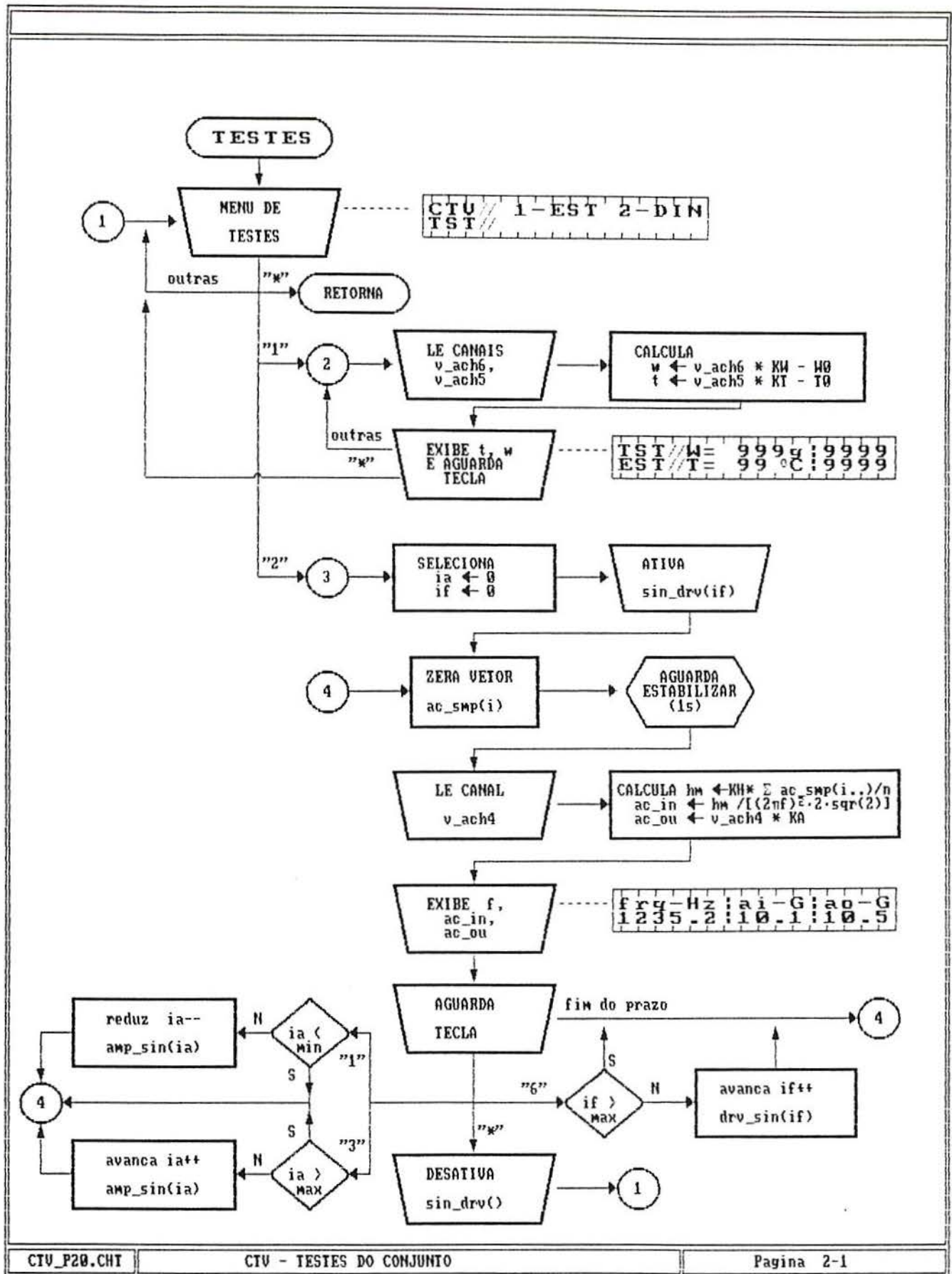


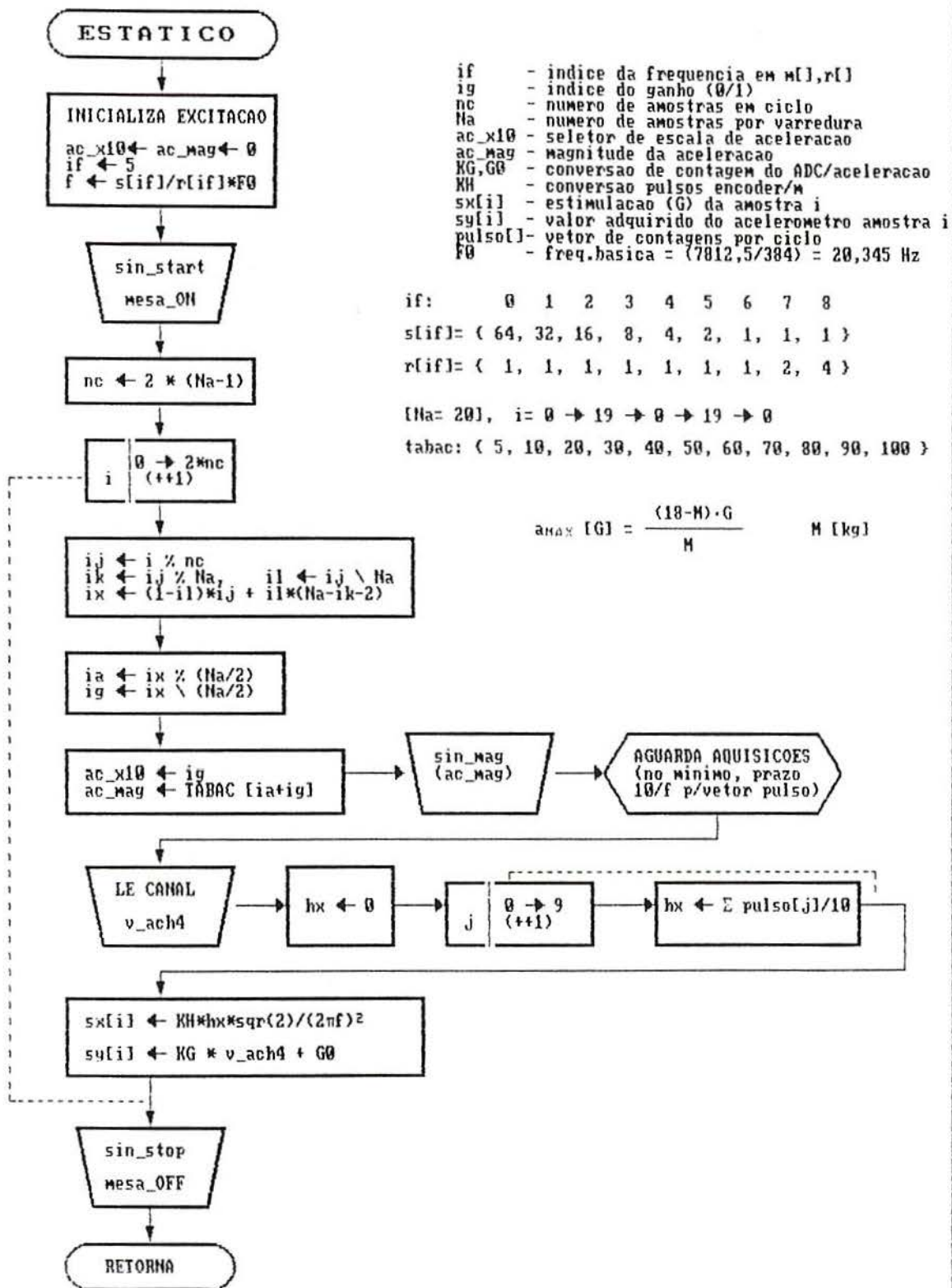




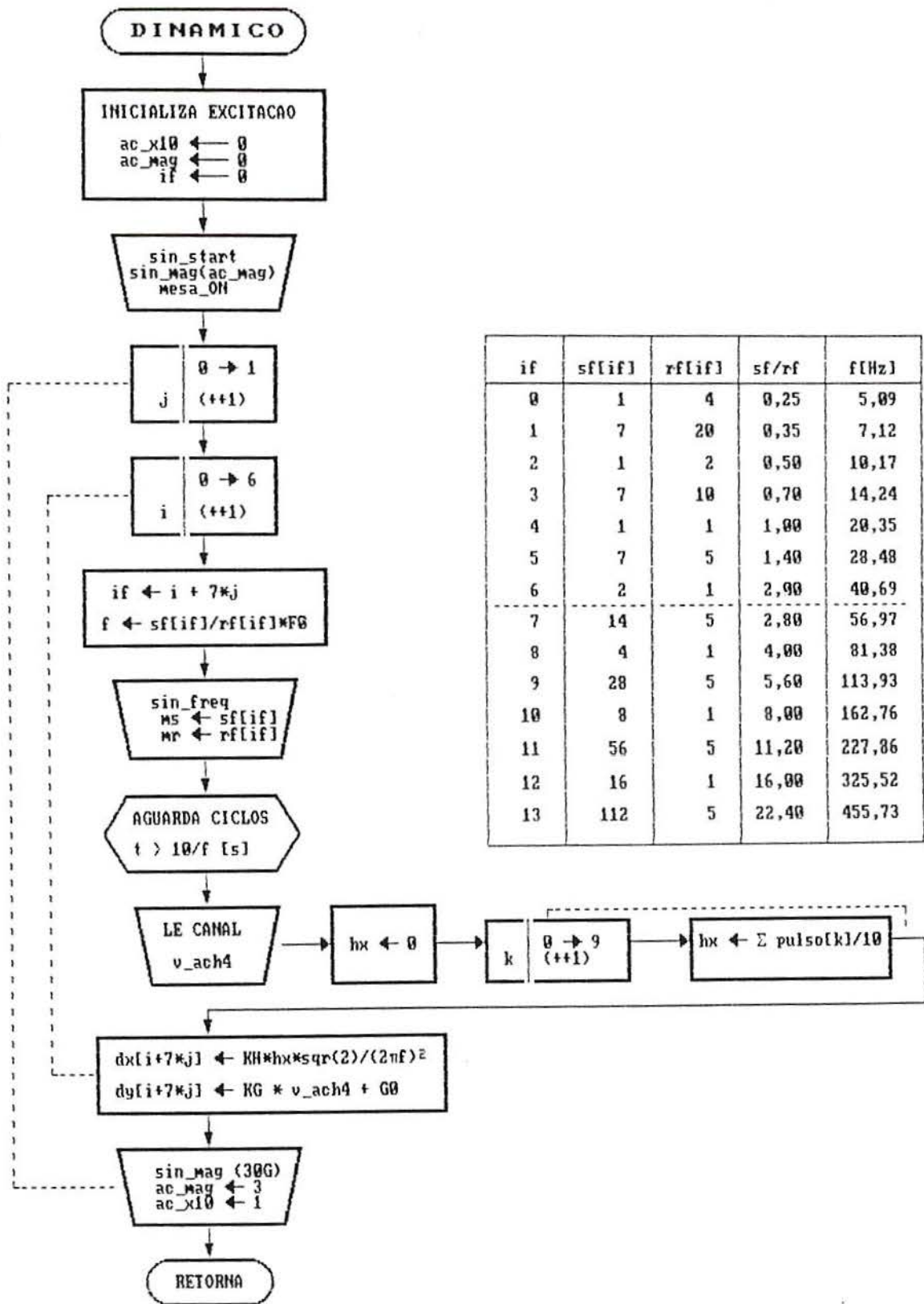




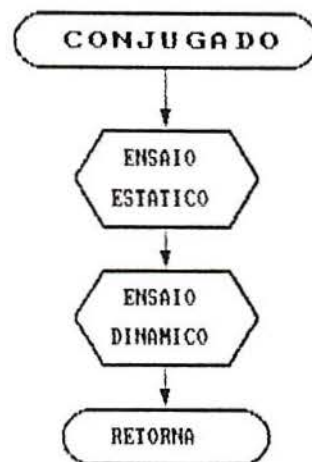


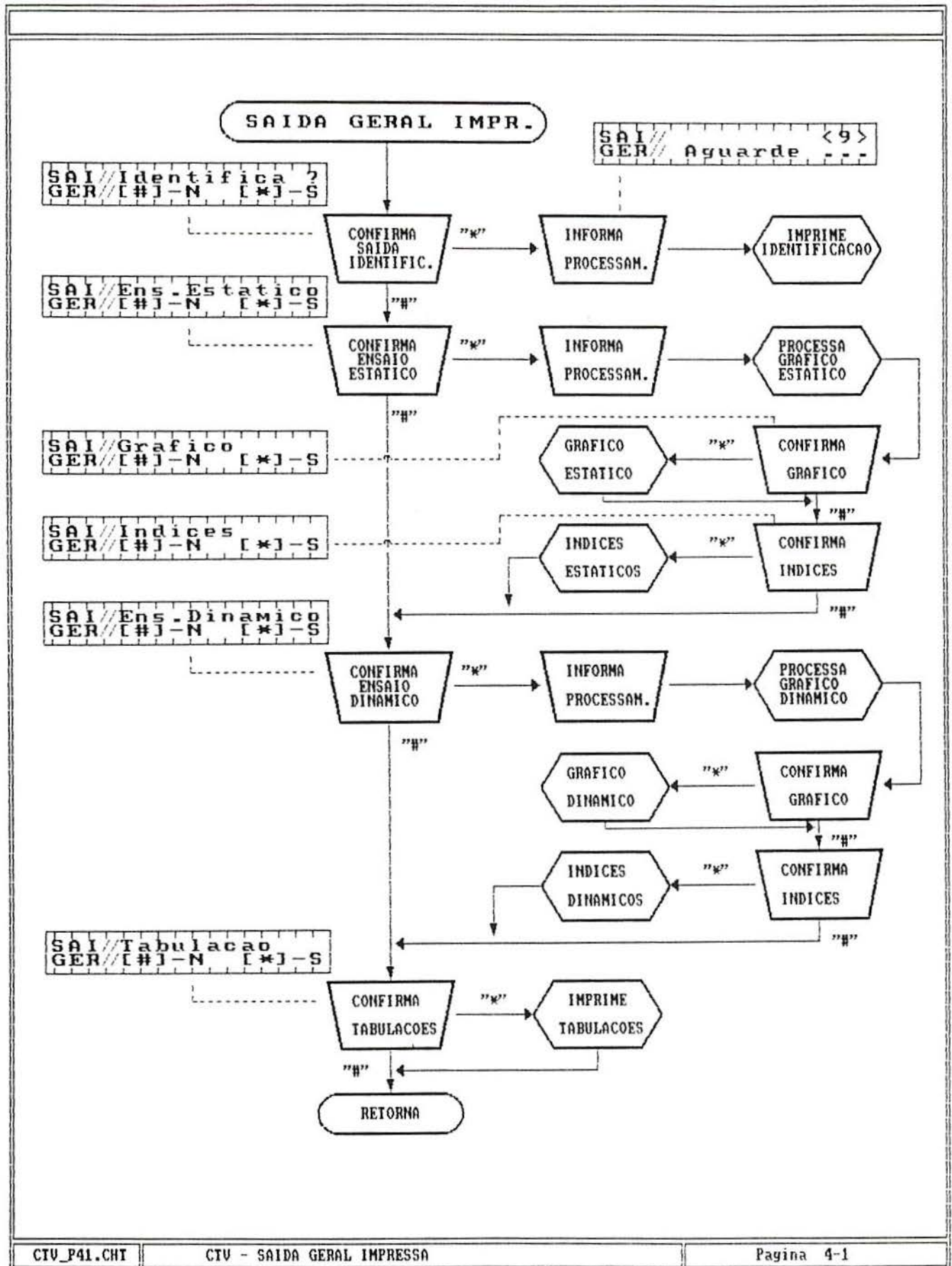












## GRAF. ESTATICO

DETERMINA FAIXA ABRANGENCIA  
XMIN, XMAX1, XMAX2, XMAX  
YMIN, YMAX

PROCESSA SUBDIVISOES  
XSUB1, XSUB2, YSUB  
XSPAN1/2, YSPAN

DETERM. ESCALAS/ORIGEM  
ey, ex  
Xgo, Ygo, Xo, Yo

TRACADO DE EIXOS  
Monta vetores  
rx[], ry[], px[], py[]

PROCESSA CURVA DE  
DIFERENCAS C/RETA IDEAL  
ed, diff[]

PROCESSA VETORES DE  
PLOTAGEM DA POLIGONAL  
DE AMOSTRAGEM

PROCESSA INDICES  
E POLINOMIO (C0, C1, C2, C3)  
dh, dyh, dyr

PROCESSA VETORES PLOT  
DAS COORDENADAS DE PTOS  
NOTAVEIS

PLOTAGEM DE VETORES  
NA IMPRESSORA SERIAL

RETORNA

## INDICES ESTAT

IMPRIME  
SENSIBILIDADE

IMPRIME  
DESVIO  
LINEARIDADE

IMPRIME  
HISTERESE

IMPRIME  
DESVIO  
REPETIBILIDADE

IMPRIME  
COEFICIENTES  
POLINOMIO

RETORNA

```

File : SIN.C
Sheet : 1
-----
#include <ieee754.h>
#include <8096.h> /* 8x9x library */

#define PWM_ON 0x01 /* habilita PWM no loc1 */
#define SIN_GND 128 /* */
#define VECTOR_0 (int *) 0x400A
#define SW_TIMER1_ON 0x18
#define ASCII 48

#define SIN_SIZE 192
#define SIN_TSH 64 /* 64 x 8 states/Tmr1 = 2 PWM */
#define SIN_NM 8

/* ffreq (Hz) = 20.4; 14.4; 10.2; 7.2; 5.1; 3.6; 2.3; 1.8; 1.25 */
const word MS [ ] = { 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1 }
const word MR [ ] = { 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1 }
const byte TS [SIN_SIZE] = {
    128, 130, 132, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146,
    148, 150, 152, 154, 156, 158, 160, 162, 164, 166,
    168, 170, 172, 174, 176, 178, 180, 182, 184, 186,
    188, 190, 192, 194, 196, 198, 200, 202, 204, 206,
    208, 210, 212, 214, 216, 218, 220, 222, 224, 226,
    228, 230, 232, 234, 236, 238, 240, 242, 244, 246,
    248, 250, 252, 254, 256, 258, 260, 262, 264, 266,
    268, 270, 272, 274, 276, 278, 280, 282, 284, 286,
    288, 290, 292, 294, 296, 298, 300, 302, 304, 306,
    308, 310, 312, 314, 316, 318, 320, 322, 324, 326,
    328, 330, 332, 334, 336, 338, 340, 342, 344, 346,
    348, 350, 352, 354, 356, 358, 360, 362, 364, 366,
    368, 370, 372, 374, 376, 378, 380, 382, 384, 386,
    388, 390, 392, 394, 396, 398, 400, 402, 404, 406,
    408, 410, 412, 414, 416, 418, 420, 422, 424, 426,
    428, 430, 432, 434, 436, 438, 440, 442, 444, 446,
    448, 450, 452, 454, 456, 458, 460, 462, 464, 466,
    468, 470, 472, 474, 476, 478, 480, 482, 484, 486,
    488, 490, 492, 494, 496, 498, 500, 502, 504, 506,
    508, 510, 512, 514, 516, 518, 520, 522, 524, 526,
    528, 530, 532, 534, 536, 538, 540, 542, 544, 546,
    548, 550, 552, 554, 556, 558, 560, 562, 564, 566,
    568, 570, 572, 574, 576, 578, 580, 582, 584, 586,
    588, 590, 592, 594, 596, 598, 600, 602, 604, 606,
    608, 610, 612, 614, 616, 618, 620, 622, 624, 626,
    628, 630, 632, 634, 636, 638, 640, 642, 644, 646,
    648, 650, 652, 654, 656, 658, 660, 662, 664, 666,
    668, 670, 672, 674, 676, 678, 680, 682, 684, 686,
    688, 690, 692, 694, 696, 698, 700, 702, 704, 706,
    708, 710, 712, 714, 716, 718, 720, 722, 724, 726,
    728, 730, 732, 734, 736, 738, 740, 742, 744, 746,
    748, 750, 752, 754, 756, 758, 760, 762, 764, 766,
    768, 770, 772, 774, 776, 778, 780, 782, 784, 786,
    788, 790, 792, 794, 796, 798, 800, 802, 804, 806,
    808, 810, 812, 814, 816, 818, 820, 822, 824, 826,
    828, 830, 832, 834, 836, 838, 840, 842, 844, 846,
    848, 850, 852, 854, 856, 858, 860, 862, 864, 866,
    868, 870, 872, 874, 876, 878, 880, 882, 884, 886,
    888, 890, 892, 894, 896, 898, 900, 902, 904, 906,
    908, 910, 912, 914, 916, 918, 920, 922, 924, 926,
    928, 930, 932, 934, 936, 938, 940, 942, 944, 946,
    948, 950, 952, 954, 956, 958, 960, 962, 964, 966,
    968, 970, 972, 974, 976, 978, 980, 982, 984, 986,
    988, 990, 992, 994, 996, 998, 1000, 1002, 1004, 1006,
    1008, 1010, 1012, 1014, 1016, 1018, 1020, 1022, 1024, 1026,
    1028, 1030, 1032, 1034, 1036, 1038, 1040, 1042, 1044, 1046,
    1048, 1050, 1052, 1054, 1056, 1058, 1060, 1062, 1064, 1066,
    1068, 1070, 1072, 1074, 1076, 1078, 1080, 1082, 1084, 1086,
    1088, 1090, 1092, 1094, 1096, 1098, 1100, 1102, 1104, 1106,
    1108, 1110, 1112, 1114, 1116, 1118, 1120, 1122, 1124, 1126,
    1128, 1130, 1132, 1134, 1136, 1138, 1140, 1142, 1144, 1146,
    1148, 1150, 1152, 1154, 1156, 1158, 1160, 1162, 1164, 1166,
    1168, 1170, 1172, 1174, 1176, 1178, 1180, 1182, 1184, 1186,
    1188, 1190, 1192, 1194, 1196, 1198, 1200, 1202, 1204, 1206,
    1208, 1210, 1212, 1214, 1216, 1218, 1220, 1222, 1224, 1226,
    1228, 1230, 1232, 1234, 1236, 1238, 1240, 1242, 1244, 1246,
    1248, 1250, 1252, 1254, 1256, 1258, 1260, 1262, 1264, 1266,
    1268, 1270, 1272, 1274, 1276, 1278, 1280, 1282, 1284, 1286,
    1288, 1290, 1292, 1294, 1296, 1298, 1300, 1302, 1304, 1306,
    1308, 1310, 1312, 1314, 1316, 1318, 1320, 1322, 1324, 1326,
    1328, 1330, 1332, 1334, 1336, 1338, 1340, 1342, 1344, 1346,
    1348, 1350, 1352, 1354, 1356, 1358, 1360, 1362, 1364, 1366,
    1368, 1370, 1372, 1374, 1376, 1378, 1380, 1382, 1384, 1386,
    1388, 1390, 1392, 1394, 1396, 1398, 1400, 1402, 1404, 1406,
    1408, 1410, 1412, 1414, 1416, 1418, 1420, 1422, 1424, 1426,
    1428, 1430, 1432, 1434, 1436, 1438, 1440, 1442, 1444, 1446,
    1448, 1450, 1452, 1454, 1456, 1458, 1460, 1462, 1464, 1466,
    1468, 1470, 1472, 1474, 1476, 1478, 1480, 1482, 1484, 1486,
    1488, 1490, 1492, 1494, 1496, 
```



File : CALSTAT.C

Sheet : 1

```

*****
File : CALSTAT.C                               Sheet : 1
*****
CALSTAT - SCH - NOV/94 - REGISTRO DE CALIBRACAO ESTATICA SIMULADO
*****

#define TRUE 1
#define FALSE 0

typedef unsigned char BYTE;
typedef unsigned int word;

BYTE c;
word z, xg0, yg0, xgsbn, ygsbn, l;
int na, ni, xo, yo, xg, yg;
float x[40], y[40], dif[40], st[5],
s, l, r, dl, dh, dr, ex, ey, ed;
float xspan, xspan1, xspan2, yspan,
xmin, xmax1, xmax2, ymin, ymax,
xsub, xsub1, xsub2, ysub,
xqmin, xqmax, yqmin, yqmax;

float f2, f3, v0, h, fr, da; /* valores p/simulacao */
char unx[10], uny[10], val[10];

BYTE prt[15][15], stx[15][10], tab[10][80]; /* trechos de texto */
word gpx[1000], gpy[1000], np; /* pontos a graficar */
gix[200], giy[200], /* vetores de reta */
ghx[30], ghy[30], gnt[30], nh; /* retas horizontais */

int isgn(int), sgn(float), iton(int,int);
float xt(int,float,float,float), y_sim(float),
xtoy(float,float);

void escalas(), proc_faixa(), proc_subdiv(), eixos(), poligonal(),
calc_indic(), entrada_param(), simula(), calc_dif(), pontos(),
subdivide(float,float,float*,float*,float*,float*),
eng_form(float,char*),
traduz(char*), strind(BYTE,char*,BYTE), *string(BYTE,BYTE);

void grt_pt(int,int,int), /* ponto (linha, coluna grafica) */
grt_rt(int,int,int,int), /* segmento de reta (pt1, pt2) */
grt_di(int,int), /* diamante */
grt_hz(int,int,int); /* horizontal (pt1, tamanho) */

void main ()
{
    int i;
    z=200; xg0=100; xgsbn=450; yg0=96; ygsbn=100; /*Param.graficos*/
    np=nr=nh=0; /*Vetores grafic*/

    /*** PROCEDIMENTO INICIAL ***/
    entrada_param(); simula(); /* Ajusta parametros p/simul, gera dados*/
    traduz(unx); /* Traduz unidades especiais */
    traduz(uny);
    for (i=1; i<=nh; i++)
    {
        gotoxy ((i-1) MOD na)+10, ((i-1)\na)*20+1;
        printf ("N2d N4.1f N4.1f", i, x[i], y[i]);
    }
    gotoxy (15,1); printf ("N2d N4.1f N4.1f", 0, x[0], y[0]);
    gotoxy (24,1); c=getch();

    proc_faixa(); proc_subdiv(); /* Determina dominio do grafico */
}

/* SCREEN 2,1 : CLS */
/* Tela Grafica */

escalas(); eixos(); /* Processa escalas e traca eixos (quadro) */
calc_dif(); /* Calcula curva de diferencas */
poligonal(); /* Plota poligonal e acessorios */
calc_indic(); pontos(); /* Calcula indices e assinala pto's criticos*/

/*** TABELA DE INDICES CARACTERISTICOS [200] ***/

st[0]=.0001; st[1]= yspan/xspan1; st[2]=.032; st[3]= -.001; /*SIMUL*/
for (i=0; i<10; i++) c= strset(tab[i], ".79");
l=0; /* Linha inicial da tabela */
s= (y[na]-y[0])/(x[na]-x[0]); /* Sensibilidade reta ideal ciclo 1 */
sprintf (tab[1], "Sensibilidade : N4.2f Ns/Ns", s, uny, unx);
l= dl/(y[na]-y[0]); /* Nao-linearidade terminal ciclo 1 */
sprintf (tab[1+1], "Nao-Linearidade : N4.2f NNF50", 100*l);
h= dh/(y[na]-y[0]); /* Histerese */
sprintf (tab[1+2], "Histerese : N4.2f NNF50", 100*h);
r= dr/(y[na]-y[0]); /* Nao-repetibilidade */
sprintf (tab[1+3], "N-Repetibilidade: N4.2f NNF50", 100*r);
sprintf (tab[1+4], "Polinomio ajust.: (C0 + C1x + C2x2 + C3x3)");
sprintf (tab[1+5], "(A IN)");
for (i=0; i<=3; i++)
{
    eng_form(st[i], val); /* Notacao Engenharia em val */
    /* LOCATE 1/2+1t+7, (1 MOD 2)*20+35 : PRINT "C"+CHR$(1+48)+"=" +val[i];*/
}

/******
300 --- FINAL E GRAVACAO ---
305
310 xs= inkey$ : if xs="" THEN GOTO 310
320 if xs<>">" THEN GOTO 100
330 o.fs= "CAL_F42.EPS" : o.me= 10
340 CHAIN "REGSCR",30,ALL
*****
*/

/*** CALCULO DE POSICAO x[i] NO EIXO MULTI-CICLOS DE na AMOSTRAS ***/
float xt (int zi, float z1, float z2, float ex)
{
    return (-(zi/na>0)*2*z1-(zi/na>2)*2*z2+iton(-1, zi/na)*ex);
}

/*** DETERMINA ESCALAS (pixel/mensuron)/BASE ACORDE C/LINHAS TEXTO [1100] ***/
void escalas ()
{
    int ndy, ygs;
    ndy= (int)(yqmax-yqmin)/ysub; ygs= 8*(int)(ygsbn/ndy/8+.5);
    ey= ygs/ysub; /* Escala Y */
    ex= xgsbn/(2*(xspan1+xspan2)); /* Escala X */
    xg0= 8*(xg0/8); yg0= 8*(yg0/8);
    xq= (int)(xg0-ex*xmin); yq= (int)(yg0-ey*ymin)+4; /*Bases X,Y (pix)*/
}

/*** PROCESSA FAIXA DE ABRANGENCIA DA AMOSTRAGEM [1200] ***/
}

```

File : CALSTAT.C

Sheet : 2

```

void proc_faixa()
{
    word i; int xmax;
    xmax = xmin = xcol; xmax1 = xmax2 = xmax; ymax = ymin = ycol;
    for (i=1; i<=n1; i++)
    {
        if (x[i]>ymax) xmax = x[i];
        if (i%20==0)
        {
            if (x[i]>ymax1) xmax1 = x[i];
            else
            {
                if (x[i]>ymax2) xmax2 = x[i];
                if (x[i]<ymax) ymax = x[i];
                if (y[i]>ymax) ymax = y[i];
                if (y[i]<ymin) ymin = y[i];
            }
        }
    }
}

/** PROCESSA SUBDIVISOES DA AREA A GRAFICAR (USA xqspn,yqspn) [1300] ***/
void proc_subdiv (void)
{
    subdivide (xmin, xmax1, xsub1, xspan1, xqmin, xqmax);
    subdivide (xmin, xmax2, xsub2, xspan2, xqmin, xqmax);
    if (xsub2>xsub1)
    {
        xsub=xsub1; xspan=xspan1;
    }
    else
    {
        xsub=xsub2; xspan=xspan2;
    }
    subdivide (ymin, ymax, ysub, yspan, yqmin, yqmax);
}

/** DETERMINA SUBDIV qsub,FAIXA qspn,qqmin,qqmax P/(qmax,qmin) [1000] ***/
void subdivide (float qmax, float qmin, float *qsub,
               float *qspan, float *qqmin, float *qqmax)
{
    int ndiv, nord, nd;
    float qdvn, qdiv;

    *qspan = qmax-qmin;
    ndiv = (int) xtoy(2,(sqn(qmax)-sqn(qmin))) + 1; /* Faixa da variavel a graficar */
    qdiv = *qspan/ndiv; /* N minimo subdivisoes */
    nord = (int) (log(qdiv)/log(10)); /* Passo maximo da subdivisao */
    qdvn = qdiv/xtoy(10,(float)nord); /* Ordem de grandez do passo */
    if (qdvn>4)
    {
        *qsub = 5; /* Determina passo maximo norm. */
    }
    else
    {
        if (qdvn>2) *qsub = 2; else *qsub = 1;
    }
    *qspan = xtoy(10,nord); /* Valor absoluto de subdivisao */
    *qqmin = ((int)(qmin/*qsub)) * (*qsub); /* Inicio graficacao */
    nd = (int) (qmax/*qsub); /* Extremo faixa graficada */
    if (nd/*qsub==qmax) *qqmax = *qsub*nd; else *qqmax = *qsub*(nd+1);
}

/** TRACADO DE EIXOS [1600] ***/
void eixos()
{
    BYTE i, ndx;
    int xq, xq1, lnx;
    float yq;
    grf_rt (1,1,200); grf_hz (1,200,640); /* moldura */
    grf_rt (640,200,640,1); grf_hz (1,1,640);

    yq = z-(y0+ey*ymin);
    if (ymin==0) grf_rt(x0-5,yq,x0+xqspn+5,yq); /* Eixo XX' inf.*/
    else for (xq=x0-5; xq<=x0+xqspn; xq+=10) grf_rt(xq,yq,xq+4,yq);

    ndx = (int)(xspan1/xsub); xq = x0+(ex*2*xspan1);
    for (i=1; i<=ndx; i++) /* Divisao eixo XX' xsub */
    {
        xq = ex*(xmin+i*xsub);
        xq = x0+xq; grf_rt (xq,yq+3,xq,yq);
        xq = xq+4; grf_rt (xq,yq+3,xq,yq);
    }
    ndx = (int)(xspan2/xsub);
    for (i=1; i<=ndx; i++) /* Divisao eixo XX'2 xsub */
    {
        xq = ex*(xmin+i*xsub);
        xq = xq+4; grf_rt (xq,yq+3,xq,yq);
        xq = x0+xqspn-xq; grf_rt (xq,yq+3,xq,yq);
    }

    yq = z-(y0+ey*ymax); grf_rt(x0-5,yq,x0+xqspn+5,yq); /* Eixo YY' sup. */
    for (i=1; i<=20; i++) /* Divisao eixo XX' (%) */
    {
        xq = x0+ex*i*xspan1/10; grf_rt(xq,yq,xq,yq-2+(i%5==0));
        for (i=1; i<=20; i++) /* Divisao eixo XX'2 (%) */
        {
            xq = xq+ex*i*xspan2/10; grf_rt(xq,yq,xq,yq-2+(i%5==0));
        }
    }
    lnx = ((z-yq0)/8)+1;
    for (i=0; i<=2; i++) /* Subdiv Eixos XX' 1.c */
    {
        xq = x0+ex*xspan1;
        grf_rt(xq,z-(y0-1+ey*ymin),xq,z-(y0+3+ey*ymax));
        sprintf(prtfclnz1,"%s%3d",string(" ",(xq/8)-1),(int)(x[i]*na));
    }
    for (i=1; i<=2; i++) /* Subdiv Eixos XX' 2.c */
    {
        xq = xq+ex*xspan2;
        grf_rt(xq,z-(y0-1+ey*ymin),xq,z-(y0+3+ey*ymax));
        sprintf(prtfclnz1,"%s%3d",string(" ",(xq/8)-1),(int)(x[(i+2)*na]));
    }
    /* LOCATE lnx,(xq/8)+4 : PRINT unx; */
    for (y=yqmin; y<=yqmax; y+=ysub) /* Divisoes eixo YY' ysub */
    {
        if (i(y<ymin || y>ymax))
        {
            yq = z-(y0+ey*y); grf_rt(x0-5,yq,x0,yq);
            /* LOCATE (yq/8)+1,(x0/8)-5 : PRINT USING "####";INT(Y); */
        }
        /* LOCATE (z-y0-ey*ymax)/8,(x0/8)-7 :PRINT uny; */
        /* LOCATE (z-y0-ey*ymax)/8+1,(x0/8)-5 :PRINT USING "####";INT(ymax) */
        /* LOCATE lnx-1,(x0/8)-5 : PRINT USING "####";INT(ymin) */
        /*
        xq = x0+xqspn;
        for (i=1; i<=10; i++) /* Divisoes eixo YY' (%) */
        {
            y = yspan/10*i+ymin;
            yq = z-(y0+ey*y); grf_rt(xq,yq,xq+3-3*(i%5==0),yq);
        }
        /* LOCATE (z-y0-ey*ymax)/8,(x0+xqspn)/8+3 : PRINT "100%"; */
    }
}

/** PLOTAGEM DA CALIBRACAO EM 2 CICLOS [2000] ***/
void poligonal (void)
{
    int i, ia, ic, j, k, ia, xga, xgb, ygb, xgi, ygi, xgf, ygf;
    float xa, xb, dga, dgy, dxg, dyg;
    ia=0;
    for (k=1; k<=4; k++) /* Traça retas ideais entre ptos finais */
    {
        ia = iton(-1,ia); xa = -(ia>0)*2*xspan1-(ia>2)*2*xspan2+ia*x[ia*na];
        ic = iton(-1,k); xb = -(k>0)*2*xspan1-(k>2)*2*xspan2+ic*x[ic*na];
        dga = ey*(y[k*na]-y[ia*na])/20; dgy = ex*(xb-xa)/20;
        xga = x0+ex*xa; ygb = z-(y0+ey*y[ia*na]);
        for (i=1; i<=20; i++) grf_pt(i*dga+xga,ygb-i*dgy);
        ia = k;
    }
}

/**-- PLOTA POLIGONAL [X;Y] ATE' n1 (em segmentos de reta) --**/
)

```



File : CALSTAT.C

Sheet : 3

```

for (i=0; i<n1; i++) /* Percorre amostras */
{
    j=i+1;
    x= xt(i,xspan1,xspan2,x[i]); xb= xt(j,xspan1,xspan2,x[j]);
    ic= 1/n1; is= iton(-1,ic);
    xa= -(ic>0)*2*xspan1-(ic>2)*2*xspan2 + is*x[i];
    ic= j/n1; is= iton(-1,ic);
    xb= -(ic>0)*2*xspan1-(ic>2)*2*xspan2 + is*x[j];
    xqb= ex*xb+x0; yqb= z-(y0+ey*y[i]); /* Poligonal */
    grt_pt(ex*xb+x0,z-(y0+ey*y[i]),xqb,yqb); /* Marca ponto amostra */
    yqi= z-(y0+ey*ymin+ed*dif[i]); yqf= z-(y0+ey*ymin+ed*dif[j]); /* dif */
    xqi= x0+ex*xs; xqf= xqb; dyq= (yqf-yqi)/5; dxq= (xqf-xqi)/5;
    for (k=0; k<5; k++) grt_pt (xqi+k*dxq,yqi+k*dyq);
}

/* LOCATE ((z-yq0-ygsn/5)/8),((xq0+xgsn)/8)+3 : PRINT "dif:"
/* LOCATE ((z-yq0-ygsn/5)/8)+1,((xq0+xgsn)/8)+2 : PRINT USING "NN.NN";d1
*/
}

/**** CONVERSAO DE VALOR V PARA STRING EM V8 COM 9 POSICOES [2100] ****/
void eng_form (float v, char *s)
{
    int is, ix, isx, im, ir; char *cq[4], *cv[6], *cx[6];
    float vlg, vm;

    if (v==0) { *s= "+0.00"; return; }
    is= (v<0)?-1:1; vm= fabs(v); /* extrai o sinal de v */
    vlg= log(vm)/log(1000); /* Caracterist., mantissa */
    ix= (int) vlg; vm= xtoy(1000,vlg-ix); /* Expoente */
    sprintf(cq,"%+02d",ix*3);
    im= int(log(vm)/log(10)); ir= 2-im;
    vm= (int) (vm * iton(10,ir) +.5) / iton(10,ir) +.0001; /* Expressao da mantissa */
    sprintf(cv,"%4f",vm); /* Ajuste de tamanho */
    strcpy(cx,cv+1,4);

    v8= MIDE("-++",is+2,1)+vm8;
    if (ix) v8= v8+"E"+MIDE("-++",isx+2,1)+IX8;
}

/**** PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS [2200] ****/
void calc_indic()
{
    BYTE i, ix, is, ich, ish, ixr, isr, icr;
    float dyh, dyr;
    dh= 0; dr= 0; /* (Linearidade,Histerese,Repetibilidade) */
    for (i=0;i<n1,i++) /* Percorso (IX: indice do mensurando) */
    {
        ix= i/n1; ic= i/n1; is= (-1)^ic; /* ic: M ciclo, is: variac do mens. */
        xa= -(ic>0)*2*xspan1-(ic>2)*2*xspan2 + is*x[i]; /* x: abcissa total */
        if (i%10) x1= x; /* Erro LINEARIDADE ja' calc.em calc_dif */
        if (ic%1) isx= ic%2; /* (apenas nas varreduras ascendentes) */
        dyh= abs(y[i]-yC((ic+2)*na-ix)); /* Erro de HISTERESE */
        if (dyh>dh) dh= dyh;
        if (isx) { ixh= ix; ish= (ic+2)*na-ix; xh= x; /* Pior ponto */
            ixh= idh/na; ish= (-1)^ic;
            ikh= ((ich+1)/2)*200; xih= ikh+ish*x[idh];
        }
        if (ic%1) /* (apenas no primeiro ciclo) */
        {
            dyr= abs(y[i]-yC2*na+1); /* Erro de REPETIBILIDADE */
            if (dyr>dr) { dr= dyr; idr= i; idr1= 2*na+i; xrr= x; /* Pior ponto */
                ixr= idr/na; isr= idr/na; iar= (-1)^icr;
                ikr= ((icr+1)/2)*200; xir= ikr+isr*x[idr1];
            }
        }
    }
}

/**** PLOTAGEM DAS COORDENADAS NOTAVEIS AOS CRITERIOS [2300] ****/
void pontos ()
{
    yt= yCidr1; yqi= yt; if (ydl>yt) yt= ydl; else yqi= ydl; /* LINEARIDADE */
    xg= x1+ex*x0; dxq= (xgsn-ex*x1)/20; dy= (yt-ymin)/20;
    for (i=1;i<=20;i++) /* grt_pt (xg,z-(y0+ey*(ymin+dy*i))) */
    {
        x= i*dxq+xg; /* grt_pt (X,z-(y0+ey*yt)) ; grt_pt (X,z-(y0+ey*yqi)) */
        dy1= (yCidh1-ymin)/10; dy2= (yCidh1-ymin)/10; /* HISTERESE */
        yq= yCidh1-yCidh1 ? yCidh1*ey+y0 : yCidh1*ey+y0;
        xq2= xt(idh1,xspan1,xspan2,xCidh1)*ex+x0;
        xq1= xt(idh,xspan1,xspan2,xCidh1)*ex+x0; dx= (xq2-xq1)/10;
        for (i=1;i<=10;i++)
        {
            /* grt_pt (xq1,z-(y0+ey*(ymin+dy1*i)))
            /* grt_pt (xq2,z-(y0+ey*(ymin+dy2*i)))
            grt_pt (xq1+dx*i,z-yq) */
        }
        dy1= (yCidr1-ymin)/10; dy2= (yCidr1-ymin)/10; /* REPETIBILIDADE */
        yq= yCidr1-yCidr1 ? yCidr1*ey+y0 : yCidr1*ey+y0;
        xq2= xt(idr1,xspan1,xspan2,xCidr1)*ex+x0;
        xq1= xt(idr,xspan1,xspan2,xCidr1)*ex+x0; dx= (xq2-xq1)/10;
        for (i=1;i<=10;i++)
        {
            /* grt_pt (xq1,z-(y0+ey*(ymin+dy1*i)))
            /* grt_pt (xq2,z-(y0+ey*(ymin+dy2*i)))
            grt_pt (xq1+dx*i,z-yq) */
        }
    }
}

/**** DEFINE CONFORMACAO DA CURVA SIMULADA [3300] ****/
void entrada_param ()
{
    BYTE var, xs[20];
    WORD c, i;
    void erro (BYTE *); int strnd (BYTE, char *, BYTE);

    clrscr(); var= 0;
    printf("CALSTAT-SIMULACAO DE CURVA DE CALIBRACAO DE TRANSDUTOR **\n\n");
    while (++var<13)
    {
        switch (var)
        {
            case 1:
                printf("a) Deform. de 2a.Ordem [0-2.0] f2= "); scanf("%s",xs);
                if (strlen(xs)==0) _exit(1) else f2= atof(xs); if (f2>2) erro(var);
                break;
            case 2:
                printf("b) Deform. de 3a.Ordem [0-1.0] f3= "); scanf("%s",xs);
                if (strlen(xs)!=0) { f3= atof(xs); if (f3>1) erro(var); } else var--2;
                break;
            case 3:
                printf("c) Deslocamento de 0 [0-100] v0= "); scanf("%s",xs);
                if (strlen(xs)!=0) { v0= atof(xs); if (v0>100) erro(var); } else var--2;
                break;
            case 4:
                printf("d) Histerese cte f2 [0-0.05] h= "); scanf("%s",xs);
                if (strlen(xs)!=0) { h= atof(xs); if (h>.05) erro(var); } else var--2;
                break;
            case 5:
                break;
        }
    }
}

```

File : CALSTAT.C

Sheet : 4

```

-----*
printf("e) Não-Repetibilidade [0-1,0] tr= "); scanf("%s",xs);
if (strlen(xs)!=0) { tr= atof(xs); if (tr>1) erro(var); } else var--=2;
break;

case 6:
printf("f) Numero amostras/verr. [2-10] na= "); scanf("%s",xs);
if (strlen(xs)!=0) { na= atoi(xs); if (na>10) erro(var); } else var--=2;
break;

case 7:
printf("g) Dispersao amostr.X [0-1,0] da= "); scanf("%s",xs);
if (strlen(xs)!=0) { da= atof(xs); if (da>1) erro(var); } else var--=2;
break;

case 8:
printf("h) Nome da unidade em X          unx= "); scanf("%s",unx);
if (strlen(xs)==0) var--=2;
break;

case 9:
printf("i) Nome da unidade em Y          uny= "); scanf("%s",uny);
if (strlen(xs)==0) var--=2;
break;

case 11:
printf("j) Faixa X [xmin:xmax] X1,XN= "); scanf("%s",xs);
if (strlen(xs)==0) { var--=2; break; }
if (i==strlen(xs)-1) { erro(var); break; }
xi= atoi(xs); xn= atoi(xs[i+1]);
break;

case 12:
printf("k) Faixa Y [ymin:ymax] Y1,YN= "); scanf("%s",xs);
if (strlen(xs)==0) { var--=2; break; }
if (i==strlen(xs)-1) { erro(var); break; }
yi= atoi(xs); yn= atoi(xs[i+1]);
break;
}

void erro(BYTE *var)
{ WORD c;
printf("-----<ERRO>-----");
c=getch(); (*var)--;
}

int strfind(BYTE ini, char *s1, BYTE c) /* acha c em s1 a partir de ini */
{ BYTE i;
for (i=ini; i<strlen(s1); i++) if (s1[i]==c) return(i);
return(-1);
}

char *string (BYTE c, BYTE n)
{ BYTE i, s[10], *p;
for (i=0; i<n; i++) (*p)++= c;
return (s);
}

/**** PRODUZ DADOS DE 2 CICLOS DE CALIBRACAO SIMULADOS [3500] ****/
void simula ()
{
i=0; x[i]=xi; y[i]=y_sim(x); /* Ponto inicial (0,y) */
for (i=1; i<=nna; i++) { x[i]=xi; /* Ponto inicial (0,y) */
if ((i!=2*nna)/4*(i!=4*nna)) /* Ptos minimos ctes */
{
ic= i\na; ix= i\nga;
x= ((ic%2)==0) ? x= ix : x= na-ix;
x= 100/na * (x+(1-rand(5))*da) /*Produce abscissa linear +dispersao*/
}
else x= 0;
y[i]= (y_sim(x) + h*y2*y[i-1])/(1+h*y2); /* C/histerese cfe f2 */
x[i]= x; ni= i; /* Conta pto gerados */
}
proc_faixa(); xspan= abs(xn-x1); yspan= abs(yn-y1);
for (i=0; i<ni; i++)
{ x[i]= x[i]/xmax*xspan+xi;
y[i]= y[i]/ymax*yspan+yi; /* Ajuste 'a faixa dada */
}
}

/**** DADO X [0-100], CALCULA Y(X) ---> y_sim [2900] ****/
float y_sim (float x)
{
float ar, y2, y3;
ar= (1\na\2)*tr; /*Alteracao de repetibilidade
y2= (ar+f2)/200*(x^2 - 100*x) /*Deformacao de 20.Grau
y3= (ar+f3)/4688*(x^3 - 150*x^2 + 5000*x) /*Deform.de 30.Grau
return ((100-v0)/100*x+v0 + y2 + y3) /*Valor conjugado de Y
}

/**** PROCESSA CARACTERES ESPECIAIS (^c) EM xs [3600] ****/
void traduz (char *frase)
{
BYTE i, j, l;
l= strlen(frase);
while (i= strfind(i, frase, '^') != 0)
{ for (j=i; j<l-1; j++) frase[j]= frase[j+1]; /* enquanto localiza ^ */
frase[i]= 128; frase[i]= NUL; --l; /* retira caractere ^ */
}
}

/**** PROCESSA CURVA DE DIFERENCA COM RETA IDEAL [3700] ****/
void calc_dif ()
{
int i, k;
float d1, dydx, x00, y00, y1, yd1;
extern float ey, ed;

d1= 0;
for (k=0; k<=3; k++)
{ y00= y[k*nna]; x00= x[k*nna]; /* Processa os ciclos */
dydx= (y[(k+1)*nna]-y00)/(x[(k+1)*nna]-x00); /* Coeficientes reta ideal */
for (i=0; i<=nna; i++)
{ y1= ((x[k*nna+i]-x00)*dydx+y00);
dif[k*nna+i]= abs( y[k*nna+i] - y1 ); /* Calculo Dif. */
if (dif[k*nna+i]>d1)
{ d1= dif[k*nna+i]; id1= k*nna+i; yd1= y1; }
}
}
ed= yspan/d1*2/10*ey; /* Escala p/curva Dif em 2/10*/

/**** MONTA VETORES GRAFICOS PARA IMPRESSORA DE LINHAS ****/
void grf_pt(int x, int y)
{ gpx[grf]= x; gpy[grf]= y; }

void grf_rt(int xi, int xf, int yi, int yf)
{ gix[grf]= xi; giy[grf]= yi; gfx[grf]= xf; gfy[grf]= yf; }
}

```



File : CALSTAT.C Sheet : 5

```

void graf_di(int xc, int yc)
{
    gixCarrj= xc-2; giyCarrj= yc-2; gixCarrj= xc; giyCarrj= yc+2;
    gixCarrj= xc; giyCarrj= yc+2; gixCarrj= xc+2; giyCarrj= yc;
    gixCarrj= xc+2; giyCarrj= yc; gixCarrj= xc+2; giyCarrj= yc+2;
    gixCarrj= xc; giyCarrj= yc-2; gixCarrj= xc-2; giyCarrj= yc;
}

void graf_hz(int xi, int yi, int tam)
{
    ghxCarrj= xi; ghyCarrj= yi; ghtCarrj= tam;
}

/**** FUNCAO SGN(X) RETORNA -1, 0, +1, CFE VALOR DE X ****/
int isgn(x)
int xi;
{
    if (x==0) return(0);
    else if (x<0) return(-1);
    else return(1);
}

int sgn(x)
float xi;
{
    if (x==0) return(0);
    else if (x<0) return(-1);
    else return(1);
}

/**** FUNCAO XTOY ELEVA X A POTENCIA Y ****/
float xtoy(x,y)
float x,y;
{
    return(exp(y*log(x)));
}

int iton(i,n)
int i,n;
{
    int k, xi;
    xi= 1; for (k=0; k<n; k++) xi*= i;
    return(xi);
}

```

File : PWMSIN.BAS

Sheet : 1

```

-----*
100 PWMSIN - SCH - NOV/93 - PARAMETERS FOR SINE-GEN USING 8098-PWM
101 GOTO 10
102 PRINT "** PWMSIN.BAS **"
103 SAVE "PWMSIN",A : END
104
105
106 --- INITIALIZATION ---
107
108 DEFINT I-N
109 PI= 3.14159265358
110 FMAX= 1.2E+07
111 CMAX= 2.2E-07
112 DX=.01
113 X0= 308 : Y0= 200
114 DIM F(15),NS(12),NR(12)
115
116 --- INITIAL PROCEDURE
117
118 CLS : SCREEN 2,1 : GOSUB 5900
119 LOCATE 3,2 : INPUT "Samples/cycle= 4n+2 / n=" : X$
120 IF X$="" THEN LOCATE 3,2 : PRINT SPACE(30) : GOTO 900
121 NSC= 4*VAL(X$)+2 : LOCATE 4,12 : PRINT "NSC=" : NSC
122 LOCATE 5,2 : INPUT "Fmin (Hz)= " : X$ : IF X$="" THEN FMIN= VAL(X$)
123 NF= 0 : N1= 1 : N2= 1
124 NUM= 115
125 FIMX= FMAX/768/NSC/2
126
127 --- XTAL & MAIN FREQUENCIES
128
129 LOCATE 8,2 : INPUT "Fxtal (Hz)= " : X$ : IF X$="" THEN IX=0 : GOTO 240
130 IF VAL(X$)>0 THEN FXT= VAL(X$) : GOTO 300
131 IX= INSTR("ABCDEFGHIJ",X$) : IF IX=0 THEN GOTO 290
132 IF IX=0 THEN GOTO 260
133 IF NF>0 AND IX<NF THEN FXT= F(IX) : GOTO 300 ELSE GOTO 290
134 IF NF>0 THEN FXT= F(NF) : GOTO 300 ELSE GOTO 300
135 BEEP : GOTO 210
136
137 LOCATE 10,2 : PRINT "Desired frequencies (Hz)";
138 FOR NL=1 TO 10
139 LOCATE 11+NL,3 : PRINT SPACE(20);
140 LOCATE 11+NL,3 : PRINT NL; : INPUT " : X$ : IF X$="" THEN GOTO 380
141 FL(NL)= VAL(X$) : IF NL=1 THEN GOTO 360
142 IF FL(NL)<FL(NL-1) THEN GOTO 360
143 E$="Use descending order" : GOSUB 5000 : NL= NL-1 : GOTO 370
144 IF FL(NL)>FIMX THEN E$="Too great" : GOSUB 5000 : NL= NL-1 : GOTO 370
145 IF FL(NL)<FMIN THEN FMIN= FL(NL)
146 NEXT NL
147 NL= NL-1 : NM= NL-1 : IF NL<1 THEN RUN
148 IF NL=1 THEN GOTO 300
149
150 --- SETTING COMPROMISE BETWEEN 2 MAIN FREQUENCIES (FL(1) & FL(2))
151
152 Find N1= FS/FL(1), N2= FS/FL(2) ( N1,N2 := # of samples/cycle )
153 Given ( N1<N2, N1=4n+2 (n Int), N2= R*N1 (R= FL(1)/FL(2) )
154
155 R= FL(1)/FL(2) : X= R : GOSUB 5100 : K1= K : K2= R*K : Find K2/K1=R (Int)
156 MX= INT((FMAX/(768*2*FL(1))-2)/4) : NX= INT((4*MX+2)/K1) : maxima
157 N= 1 : NM= 0 : FOR J=1 TO 10 : iterations
158 XM= (N*K1-2)/4 : M= -INT(-XM) : XN= (4*M+2)/K1 : N= -INT(-XN)
159 IF N>NX OR M>MX THEN GOTO 300 : Convergence
160 NM= N : NEXT J : Too large values
161 N1= 4*M+2 : NSC= N1 : N2= N1*K2/K1 : FS= FL(1)*N1 : FO= 2*768*FS
162 GOTO 370
163
164 --- SINGLE MAIN FREQUENCY
165
166 FS= FMAX/768/2 : N= INT(FS/NSC/FL(1))
167 IF N>0 THEN GOTO 340 ELSE E$="F(1) Too Large" : GOSUB 5000
168 GOTO 300
169 N1= NSC : FO= INT(N1*FL(1)*768*2)
170
171 Table of possible values for Fxtal
172
173 N= INT(FMAX/FO) : IF N=0 THEN GOTO 320 ELSE N= ((N+1)/2)*2-1
174 NF= N/2+1 : NO= NF-10 : IF NO<0 THEN NO= 0
175 FOR I=1 TO 10 : LOCATE I+11,2 : PRINT SPACE(30) : NEXT I
176 NF= NF-NO : FOR I=1 TO NF
177 F(I)= ((I+NO)*2-1)*FO : LOCATE 10,2 : PRINT " ** Select Xtal Freq: ** "
178 LOCATE 11+I,10 : PRINT CHR$(64+I) : "-"
179 PRINT USING "###,###,### Hz";F(I)
180 NEXT I
181 GOTO 200
182
183 --- XTAL AND TABLE COMPUTATIONS (GIVEN FXT, NSC, FL(1), FMIN)
184
185 IF FXT>FMAX THEN BEEP : GOTO 200
186 IF FMIN=0 THEN FMIN=1 : Assume 1 Hz if no lower limit
187 FS= FXT/768/2 : FO= FS/NSC : FO= maximum frequency
188 IF FO<FL(1) THEN E$="Too Low" : GOSUB 5000 : GOTO 200
189 IF NL>0 THEN IM= FO/FL(1) ELSE IM= 1 : Main Frequency factor
190 IT= FO/FMIN : IR= IT/IM : Total and remaining factors
191 IF IR=0 THEN IR= 1 : No margin for repetitions
192 NDB= INT(LOG(IR)/LOG(2)) : Octaves in remaining factor
193 NS= NSC*IM*2*NDB : Full-cycle table size
194 IF NS<312 THEN NR=1 : GOTO 370
195 IX= LOG(NS/312)/LOG(2) : Excess size factor
196 NDB= NDB-IX : NR= 2*IX : Decr size/ set repeat factor
197 IF IX>0 THEN GOTO 338 : new condition
198 NR= INT(FO/(INT(NS/NSC)*FMIN)+.5) : # of sample repetitions (max)
199 IF NL>1 THEN IS= FPWM/FL(2) : Second freq independent index
200
201 --- TABULATION OF RESULTS
202
203 GOSUB 5900 : Screen setup
204 LOCATE 3,2 : PRINT "Fxtal = " : PRINT USING "###,###,### Hz";FXT
205 LOCATE 4,2 : PRINT "FS = " : PRINT USING "###,###.### Hz";FS
206 LOCATE 5,2 : PRINT "Number of samples"
207 LOCATE 6,4 : PRINT USING "Min/cycle (Nsc)= " : NSC
208 LOCATE 7,4 : PRINT USING "Max/cycle (Ns)= " : NS
209 LOCATE 9,4 : PRINT "F1 = (Ms/MF) x (Fs/Ns) : Table of frequencies
210 IF NL=0 THEN GOSUB 4500 ELSE GOSUB 4700
211
212 Table file TABSIN for the C driver
213
214 E$= "Create file TABSIN (Y/N)?" : GOSUB 5010
215 IF X$<>"Y" AND X$<>"N" THEN GOTO 900
216 NSS= NS/2 : LOCATE 24,2 : PRINT "Wait..." : Computes table K(1..NSS)
217 GOSUB 5200 : GOSUB 5500
218 LOCATE 24,2 : PRINT "Creating File TABSIN"; : GOSUB 5500
219 LOCATE 23,2 : PRINT USING "Samples table in TABSIN= ###" : NSS
220 LOCATE 24,2 : PRINT USING "Quantization Ave. Error=###.##" : EMX*100;
221 ERASE K,M,S
222
223 --- LOW PASS FILTER FOR FPWM BLOCKING (Bessel 3rd order)
224
225 FO= 2*FO : WPB= 2*PI*FO : Cut and angular frequency
226 LOCATE 3,38 : PRINT "BESSEL 3rd ORDER LOW-PASS FILTER = "
227 LOCATE 4,38 : INPUT "Fc (Hz)= " : X$ : IF X$="" AND FO=0 THEN SYSTEM
228 IF X$="" THEN GOTO 914
229 IF X$="" THEN PRINT USING "#####;FC ELSE PRINT : FC= VAL(X$) : WPB= 2*PI*FO
230
231 C1B= .755 : C2B= 1.423 : C3B= .2536 : GOTO 922 : Bessel unscaled

```



File : PWMSIN.BAS

Sheet : 2

```

-----*
916 LOCATE 3,38 : PRINT " - CHEBYSHEV 3rd ORDER LOW-PASS FILTER ="
917 LOCATE 3,38 : INPUT "FC (Hz) = ",X$ : IF X$="" AND FO=0 THEN SYSTEM
918 IF X$=">" THEN GOTO 911
919 IF X$="" THEN PRINT USING "#####";FC ELSE PRINT : FC=VAL(X$) : WPB=2*PI*FC

920 C1B= 3.627 : C2B= 43.42 : C3B= .02533 'Chebyshev unscaled
922 C1A= C1B/WPB : C2A= C2B/WPB : C3A= C3B/WPB 'frequency scaling
924 X= C2A/CMAX : GOSUB 5000
926 R= Y : FOR I=1 TO 3 : R*(I)=Y$ : NEXT I 'resistors R1=R2=R3
930 V= C1A/R : V1= V : GOSUB 5100 : C1= NK
934 FOR I=1 TO C1 : C1$(I)= K$(I) : NEXT I 'capacitor C1
940 V= C2A/R : V2= V : GOSUB 5100 : C2= NK
944 FOR I=1 TO C2 : C2$(I)= K$(I) : NEXT I 'capacitor C2
950 V= C3A/R : V3= V : GOSUB 5100 : C3= NK
954 FOR I=1 TO C3 : C3$(I)= K$(I) : NEXT I 'capacitor C3
960 GOSUB 5400 'Draw filter

972 LOCATE 6,56 : PRINT " +----- C2 -----+ "
973 LOCATE 7,56 : PRINT " "
974 LOCATE 8,46 : PRINT " - R -+ R -+ R -+ " : OP : "+-":
975 LOCATE 9,48 : PRINT " " : C1 : C3 : AMP : " "
976 LOCATE 10,48 : PRINT " "
980 LOCATE 13,38 : PRINT "R=" : R1 : " : CHR$(234):
982 LOCATE 13,38 : PRINT "C1=" : V1*1E+09 : " nF":
984 LOCATE 14,38 : PRINT "C2=" : V2*1E+09 : " nF":
986 LOCATE 15,38 : PRINT "C3=" : V3*1E+09 : " nF":
995

1000 '--- FINALIZATION -----
1003
1010 X$= INKEY$ : IF X$="" THEN GOTO 1010
1020 IF X$<>">" THEN CLS : SYSTEM
1030 G.F$= "PWM" : G.ME= 10 : CHAIN "RECSOR",30,ALL 'PRINT TO A FILE
1090
1100 '--- SUBROUTINES -----
1103
1110 '--- ERROR MESSAGE IN E$
1113
1120 LOCATE 24,2 : PRINT "C "+E$+" J" : BEEP : INPUT " ",X$
1130 LOCATE 24,2 : PRINT STRING$(LEN(X$)+LEN(E$)+4," ")
1140 RETURN

1150 '--- COMPUTES INTEGER K TO OBTAIN M=K*XM INTEGER
1153
1160 XK= 1 : IF KMAX=0 THEN KMAX= 32767
1170 FOR I=1 TO 10
1180 FR= X-INT(X) : IF FR<.01 THEN GOTO 1170
1190 X= 1/FR : IF X*KX < KMAX THEN XK= X*KX ELSE GOTO 1170
1200 NEXT I
1210 K= INT(XK+.5) : KMAX= 32767
1220 RETURN

1230 '--- COMPUTATION OF DISCRETE SINE TABLE (NSS SAMPLES/SEMI-CYCLE)
1233
1240 PA= PI/NSS : NV= NSS/2+1 : NVT= 127 : G= 180/PI
1250 DIM K(NSS*2+1), M(NV), S(NSS*2+1)
1260 FOR I=1 TO NV*2-1 : S(I)= SIN((I-1)*PA) : NEXT I 'Real sine wave
1270 EMXM= 1 : EMDM= 1
1280
1290 FOR IQ=NVT TO NV STEP -1 'Scan valid peak values
1300 PRINT "X":
1310 EMXK= 0 : TEQK= 0 : ARTK= 0
1320
1330 FOR I=1 TO NV
1340 V= IQ*S(I) : K(I)= INT(V+.5)
1350 E= (V-K(I))/IQ : TEQK= TEQK + E^2 'Discrete vector
1360 NEXT I : EMXK= SQR(TEQK/NV) 'Mean square error
1370

1380 IF EMXK>EMXM THEN GOTO 1400 'Verify if less than kept
1390 FOR I=1 TO NV : M(I)= K(I) : NEXT I 'Better --> copy new vector
1400 EMXM= EMXK : IQM= IQ
1410
1420 '--- Full-period wave computation
1423
1430 FOR I=1 TO NV
1440 K(I)= 128+M(I) : K(2*NVT-I)= K(I)
1450 K(2*NVT+I-2)= 128-M(I) : K(3*NVT-I+2)= 128-M(I)
1460 NEXT I
1470
1480 RETURN

1490 '--- CREATION OF FILE TABSIN
1493
1500
1510 OPEN "TABSIN.H" FOR OUTPUT AS #1
1520 PRINT #1,"define SIN_SIZE " : INS\2
1522 PRINT #1,"define SIN_TSH " : 164: /* 64 x 8 states/Tmr1 = 2 PWM */
1524 PRINT #1,"define SIN_NM " : NM
1530 A$= "const int MS [SIN_NM] = {" : PRINT #1,A$
1532 FOR I=0 TO NM-1 : PRINT #1,USING "###,":MS(I) : NEXT I
1533 PRINT #1,USING "###,":MS(NM)
1534 A$= "const int MR [SIN_NM] = {" : PRINT #1,A$
1536 FOR I=0 TO NM-1 : PRINT #1,USING "###,":MR(I) : NEXT I
1537 PRINT #1,USING "###,":MR(NM)
1540 PRINT #1,"const unsigned char TS [SIN_SIZE] = {"
1550 FOR I=1 TO NV*2-3
1560 IF ((I-1) MOD 16)=0 THEN PRINT #1," " : PRINT #1," "
1570 NEXT I
1575 PRINT #1,USING "#####,":K(NV*2-2) : CLOSE
1580 RETURN
1590

1600 '--- LOW-PASS FILTER DRAWING
1603
1610 LINE (X0+20,Y0-38)-(X0+40,Y0-42),,B 'R1
1620 LINE (X0+110,Y0-38)-(X0+130,Y0-42),,B 'R2
1630 LINE (X0+150,Y0-38)-(X0+170,Y0-42),,B 'R3
1632 LOCATE (Y0-32)\8,(X0+242)\8 : PRINT "+"
1634 LOCATE (Y0-16)\8,(X0+242)\8 : PRINT "-"
1636 LOCATE (Y0-40)\8,(X0+242)\8 : PRINT "3"
1638 LOCATE (Y0-24)\8,(X0+242)\8 : PRINT "2"
1639 LOCATE (Y0-32)\8,(X0+288)\8 : PRINT "1"
1640 LINE (X0+250,Y0-16)-(X0+250,Y0-42)
1642 LINE (X0+250,Y0-42)-(X0+280,Y0-30) 'AMP-OP
1644 LINE (X0+280,Y0-30)-(X0+280,Y0-30)
1646 LINE (X0+15,Y0-40)-(X0+20,Y0-40) 'WIRING
1648 LINE (X0+40,Y0-40)-(X0+110,Y0-40)
1652 LINE (X0+130,Y0-40)-(X0+150,Y0-40)
1654 LINE (X0+170,Y0-40)-(X0+250,Y0-40)
1656 LINE (X0+280,Y0-30)-(X0+292,Y0-30)
1658 LINE (X0+240,Y0-10)-(X0+290,Y0-10)
1660 LINE (X0+240,Y0-20)-(X0+250,Y0-20)
1662 LINE (X0+240,Y0-20)-(X0+240,Y0-10)
1664 LINE (X0+290,Y0-40)-(X0+290,Y0-10)
1666 CIRCLE (X0+10,Y0-40),3 : CIRCLE (X0+295,Y0-30),3 'TERMINALS
1668 LOCATE (Y0-42)\8,(X0+28)\8
1669 PRINT USING " \ \ \ " : R$(1),R$(2),R$(3)
1670 FOR I=1 TO C1 : X= 20*I+30 : GOSUB 5700 : NEXT I 'C1
1672 FOR I=1 TO C2 : X= 20*I+160 : GOSUB 5700 : NEXT I 'C2
1674 FOR I=1 TO C3 : Y= 16*I+44 : GOSUB 5800 : NEXT I 'C3
1680 FOR I=1 TO C1 : LOCATE (Y0-32)\8+I,(X0+24)\8 : PRINT C1$(I) : NEXT I
1682 FOR I=1 TO C2 : LOCATE (Y0-32)\8+I,(X0+146)\8 : PRINT C2$(I) : NEXT I
1684 FOR I=1 TO C3 : LOCATE (Y0-44)\8-2*I,(X0+250)\8 : PRINT C3$(I) : NEXT I
-----*

```

File : PWMSIN.BAS

Sheet : 3

```

3686 LOCATE (Y0-40)\8,(X0-13)\8 : PRINT "PWM";
3688 RETURN
3689
3700 'Capacitor to GND in X
3710 LINE (X0+X,Y0-40)-(X0+X,Y0-25) 'CAPACITOR TO GND
3720 LINE (X0+X-3,Y0-25)-(X0+X+3,Y0-25)
3730 LINE (X0+X-3,Y0-21)-(X0+X+3,Y0-21)
3740 LINE (X0+X,Y0-21)-(X0+X,Y0-10)
3750 LINE (X0+X-3,Y0-10)-(X0+X+3,Y0-10)
3760 LINE (X0+X,Y0-5)-(X0+X+3,Y0-10)
3770 LINE (X0+X,Y0-5)-(X0+X-3,Y0-10)
3775 RETURN
3800 'Feedback capacitors at Y
3810 LINE (X0+140,Y0-Y)-(X0+140,Y0-Y+20)
3820 LINE (X0+140,Y0-Y)-(X0+220,Y0-Y)
3830 LINE (X0+290,Y0-Y)-(X0+225,Y0-Y)
3840 LINE (X0+220,Y0-Y-3)-(X0+220,Y0-Y+3)
3850 LINE (X0+225,Y0-Y-3)-(X0+225,Y0-Y+3)
3860 LINE (X0+290,Y0-Y)-(X0+290,Y0-Y+30)
3870 RETURN
3890
3900 '--- SCREEN SET UP
3905
3910 CLS : LINE (1,3)-(340,200),.8 'border
3920 LOCATE 1,15 : PRINT " ** SINE WAVE GENERATION WITH 8098 PWM ** ";
3930 LINE (252,200)-(252,16)
3940 RETURN
3990
4000 '--- COMPONENT FIT TO COMMERCIAL VALUES
4005
4010 DATA 82,68,56,47,39,33,27,22,18,15,12,10
4015
4020 IF X=0 THEN Y=0 : Y$="" : RETURN 'null value
4030 XL= LOG(X)/LOG(10) : LC= INT(XL+.000001) : LX= INT(10^(XL-LC+1)+.0001)
4040 RESTORE 4010 : FOR I=1 TO 12 : READ LV : IF LV>LX THEN NEXT I
4050 LU= LC\3 : LM= LC MOD 3 : IF LM<0 THEN LU= LU-1 : LM= LM+3
4055 Y$= STR$(LV*10^(LM-1))
4060 Y$= RIGHT$(Y$,LEN(Y$)-1)+MID$("fnum kM0",LU+6,1) 'Comp.Code
4070 Y= LV*10^(LC-1) 'Comp.Value
4080 RETURN
4090
4100 '--- COMPONENT SET TO COPE WITH A GIVEN VALUE (V)
4105
4110 DX = MARGIN OF TOLERANCE (FRACTION 0.0-1.0)
4120 VY = FINAL VALUE ACHIEVED
4130 K$ = SET OF COMPONENT CODES
4140 NK = NUMBER OF ELEMENTS USED (MAX=3)
4150
4160 VY= 0 : X= V : DV= DX*V 'absolute margin
4170 FOR NK=1 TO 3
4180 GOSUB 4000 : K$(NK)= Y$ : VY= VY+Y 'collect results
4190 X= V-VY : IF DV<X THEN NEXT NK 'next turn
4200 RETURN
4210
4220 '--- SELECTION OF MS/MR FOR GIVEN FI/FO
4230
4240 XF= FI*NS/FS : KMAX= NS\NSC : IF XF<1 THEN GOTO 4250
4250 X= XF : GOSUB 5100 : MR= K : MS= INT(K*XF+.5) : GOTO 4270
4260 XF= FS/(FI*NS) : X= XF : GOSUB 5100 : MS= K : MR= INT(K*XF+.5)
4270 KN= INT(MS/(NS\NSC)) : IF KN>1 THEN MR= MR\KN : MS= INT(FI*NS*MR/FS+.5)
4280 RETURN
4290
4300 '--- EXPONENTIAL TABLE OF FREQUENCIES
4305
4310 LOCATE 11,4 : PRINT "1 MS MR F1 (Hz) Er%";
4320 FOR I=0 TO NDB
4330
4342 MS(I)= 2^(NDB-I) : MR(I)= 1 : FI= MS(I)*FS/(NS*MR(I))
4344 LOCATE 12+I,3 :PRINT USING "MM MMH MM H,MMM.H" = "I,MS(I),MR(I),FI
4346 NEXT I
4350 FOR I=NDB+1 TO 12
4352 MS(I)= 1 : MR(I)= 2^(I-NDB) : FI= MS(I)*FS/(NS*MR(I))
4354 IF FI<FMIN THEN GOTO 4360
4356 LOCATE 12+I,3 :PRINT USING "MM MMH MM H,MMM.H" = "I,MS(I),MR(I),FI
4358 NEXT I
4360 NM= I : RETURN
4370
4380 '--- TABLE OF LISTED FREQUENCIES
4385
4390 LOCATE 11,4 : PRINT "1 MS MR Freq F1 (Hz) Er%";
4400 FOR N=1 TO NL
4410 FI= FL(N) : GOSUB 4200 : MS(N-1)= MS : MR(N-1)= MR
4420 FI= (FS*MS)/(NS*MR) : E= ABS(FI-FL(N))*100/FL(N) : LOCATE 11+N,3
4430 PRINT USING "MM MMH MM H,MMM H,MMM.H M.N";N-1,MS(N-1),MR(N-1),FL(N),FI,E
4440 NEXT N
4450 RETURN
4460

```



File : CALSTAT.BAS

Sheet : 1

```

1  CALSTAT - SCH - NOV/94 - REGISTRO DE CALIBRACAO ESTATICA SIMULADO
2  GOTO 10
3  PRINT "** CALSTAT **" : SAVE "CALSTAT",A
4
5  SCREEN 0,0 : COLOR 2,0,4 : END
6
7  --- INICIALIZACAO ---
8
9  DEF FNXT(ZI,Z1,Z2,ZX)=-(ZI\NA>0)*2*Z1-(ZI\NA>2)*2*Z2+(-1)^(ZI\NA)*ZX
10 Z=200 : X0=100 : XGSPN=400 : Y0=95 : YGSPN=100 'Param.graficos
11 DIM X(40),Y(40),DIF(40)
12
13 --- PROCEDIMENTO INICIAL ---
14
15 GOSUB 3300 : GOSUB 3500 'Ajuste parametros p/simul. e gera dados
16 X=UNX : GOSUB 3400 : UNX=X 'Traduz unidades especificas
17 Y=UNY : GOSUB 3400 : UNY=Y
18 FOR I=1 TO NI
19   LOCATE ((I-1)\MOD NA)+15,((I-1)\NA)*20+1
20   PRINT USING "MM MMMM.H MMMM.H" I,X(I),Y(I) 'Linha inicial da tabela
21 NEXT I : LOCATE 15,1 : PRINT USING "MM MMMM.H MMMM.H" 0,X(0),Y(0)
22 LOCATE 24,1 : INPUT "X=" X 'Determina dominio do grafico
23 GOSUB 1200 : GOSUB 1300 'Tela Grafica
24 SCREEN 2,1 : CLS
25 GOSUB 1100 : GOSUB 1400 'Processa escalas e trace eixos (quadro)
26 GOSUB 1700 : GOSUB 1600 'Calcula curva de diferencas
27 GOSUB 2000 'Plota poligonal e accessorias
28 GOSUB 2200 : GOSUB 2500 'Calcula indices e assinala pto's criticos
29
30 --- TABELA DE INDICES CARACTERISTICOS ---
31
32 S(0)=.0001 : S(1)=YSPAN/XSPAN1 : S(2)=.032 : S(3)=-.001 '[Simulacao]
33 LT=15
34 S=(Y(NA)-Y(0))/(X(NA)-X(0)) 'Sensibilidade reta ideal ciclo 1
35 LOCATE LT,15 : PRINT USING "Sensibilidade : MMMM.MM" S
36 PRINT UNY+""/""+UNX : (terminal/ciclo 1)
37
38 L=DL/(Y(NA)-Y(0)) 'Nao-linearidade terminal ciclo 1
39 LOCATE LT+1,15 : PRINT USING "Nao-Linearidade : MMMM.MM %FSQ" 100*L
40
41 H=DR/(Y(NA)-Y(0)) 'Histerese
42 LOCATE LT+2,15 : PRINT USING "Histerese : MMMM.MM %FSQ" 100*H
43
44 R=DR/(Y(NA)-Y(0)) 'Nao-repetibilidade
45 LOCATE LT+3,15 : PRINT USING "N-Repetibilidade : MMMM.MM %FSQ" 100*R
46
47 LOCATE LT+5,15 : PRINT "Polinomio ajust.: (C0 + C1x + C2x2 + C3x3)"
48 LOCATE LT+6,15 : PRINT " (A 1X)"
49 FOR I=0 TO 3 : V=S(I) : GOSUB 2100 'Notacao Engenharia em V
50 LOCATE I\2+LT+7,(I\MOD 2)*20+35 : PRINT "C"+CHR$(I+48)+"=" : V$
51 NEXT I
52
53 --- FINAL E GRAVACAO ---
54
55 X=INKEY$ : IF X="" THEN GOTO 310 'Aguarda tecla
56 IF X<>">" THEN GOTO 100 'Novo teste
57 G.F= "CAL_F42.EPS" : G.ME= 10
58 CHAIN "RECSCR",30,ALL 'Grava tela
59 STOP
60
61 --- DETERMINA SUBDIVISOES QSUB,FAIXA QSPAN,QQMIN,QQMAX P/SIST.(QMAX,QMIN)
62
63 QSPAN=QMAX-QMIN
64 NDIV=2*(SQN(QMAX)-SQN(QMIN))+1 'Faixa de variavel a graficar
65 QDIV=QSPAN/NDIV 'M minimo de subdivisoes
66
67 ---
68
69 NORD=INT(LOG(QDIV)/LOG(10)) 'Ordem de grandez do passo
70 QDVN=QDIV/10^NORD 'Passo normal.(0 < ydvn < 10)
71 IF QDVN>4 THEN QSUB=5 : GOTO 1070
72 IF QDVN>2 THEN QSUB=2 : GOTO 1070
73 QSUB=1 'Determina passo maximo norm.
74 QSUB=QSUB*10^NORD
75 QQMIN=INT(QMIN/QSUB) 'Valor absoluto de subdivisao
76 ND=INT(QMAX/QSUB) 'Inicio graficacao
77 IF ND*QSUB=QMAX THEN QQMAX=QSUB*ND ELSE QQMAX=QSUB*(ND+1) 'Extremo faixa graficada
78 RETURN
79
80 --- DETERMINA ESCALAS (pixel/mensuron) E BASE ACORDE C/LINHAS TEXTO ---
81
82 NDY=(YQMAX-YQMIN)\YSUB : YOS=INT(YGSPN/NDY/8+.5)*8
83 EY=YOS/YSUB 'Escala Y
84 EX=XGSPN/(2*(XSPAN1+XSPAN2)) 'Escala X
85 X0=INT(X0/8)*8 : Y0=INT(Y0/8)*8
86 XQ=INT(X0-EX*QMIN) : YQ=INT(Y0-EY*YMIN)+4 'Bases X e Y (pix)
87 RETURN
88
89 --- PROCESSA FAIXA DE ABRANGENCIA DA AMOSTRAGEM ---
90
91 XMAX=X(0) : XMAX1=XMAX : XMAX2=XMAX : XMIN=X(0) : YMAX=Y(0) : YMIN=Y(0)
92 FOR I=1 TO NI
93   IF X(I)>XMAX THEN XMAX=X(I)
94   IF I>2*NA THEN GOTO 1224
95   IF X(I)>XMAX1 THEN XMAX1=X(I) : GOTO 1225
96   IF X(I)>XMAX2 THEN XMAX2=X(I)
97   IF X(I)<XMIN THEN XMIN=X(I)
98   IF Y(I)>YMAX THEN YMAX=Y(I)
99   IF Y(I)<YMIN THEN YMIN=Y(I)
100 NEXT I
101 RETURN
102
103 --- PROCESSA SUBDIVISOES DA AREA A GRAFICAR (USA XGSPN,YGSPN) ---
104
105 QMIN=XMIN : QMAX=XMAX1 : GOSUB 1000 : XSUB1=QSUB : XSPAN1=QSPAN
106 QMIN=XMIN : QMAX=XMAX2 : GOSUB 1000 : XSUB2=QSUB : XSPAN2=QSPAN
107 QMIN=QQMIN : QMAX=QQMAX : GOSUB 1000
108 IF XSUB2>XSUB1 THEN XSUB=XSUB1 : XSPAN=XSPAN1 ELSE XSUB=XSUB2 : XSPAN=XSPAN2
109
110 QMIN=YMIN : QMAX=YMAX : GOSUB 1000
111 YQMIN=QQMIN : YQMAX=QQMAX : YSUB=QSUB : YSPAN=QSPAN
112 RETURN
113
114 --- TRACADO DE EIXOS ---
115
116 CLS : LINE (1,1)-(440,200),B 'moldura
117 YQ=Z-(YQ+EY*YMIN) : IF YMIN>0 THEN GOTO 1414 'Eixo XX' inf.
118 LINE (XQ-5,YQ)-(XQ+XGSPN+5,YQ) : GOTO 1420
119 FOR XQ=XQ-5 TO XQ+XGSPN STEP 10 : LINE (XQ,YQ)-(XQ+4,YQ) : NEXT XQ
120 NDX=XSPAN1\XSUB : XQA=XQ+(EX*2*XSPAN1)
121 FOR I=1 TO NDX : XA=EX*(XMIN+I*XSUB) 'Divisao eixo XX' xsub
122 XQ=XQ+XA : LINE (XQ,YQ+3)-(XQ,YQ)
123 XQ=XQA-XA : LINE (XQ,YQ+3)-(XQ,YQ)
124 NEXT I
125 NDX=XSPAN2\XSUB
126 FOR I=1 TO NDX : XA=EX*(XMIN+I*XSUB) 'Divisao eixo XX' xsub
127 XQ=XQA+XA : LINE (XQ,YQ+3)-(XQ,YQ)
128 XQ=XQ+XGSPN-XA : LINE (XQ,YQ+3)-(XQ,YQ)
129 NEXT I
130
131 YQ=Z-(YQ+EY*YMAX) : LINE (XQ-5,YQ)-(XQ+XGSPN+5,YQ) 'Eixo XX' sup.
132 FOR I=1 TO 20 : XQ=XQ+EX*I*XSPAN1/10 'Divisao eixo XX' (X)
133 LINE (XQ,YQ)-(XQ,YQ-2+(I\MOD 5=0))
134 NEXT I

```



File : CALSTAT.BAS

Sheet : 2

```

1670 FOR I=1 TO 20 : XG= XGA+EX*I*XSPAN2/10 'Divisao eixo XX' (X)
1674 LINE (XG,YG)-(XG,YG-2+(I MOD 5=0))
1676 NEXT I
1690
1700 LN2= ((Z-YG)/8)+1
1710 FOR I=0 TO 2 : XG= XG+I*EX*XSPAN1 'Eixos YY' 1.c
1720 LINE (XG,Z-(Y0-1+EY*YMIN))-(XG,Z-(Y0+3+EY*YMAX))
1722 LOCATE LN2,(XG/8)-1 : PRINT INT(X(I*NA));
1724 NEXT I
1726 FOR I=1 TO 2 : XG= XGA+I*EX*XSPAN2 'Eixos YY' 2.c
1728 LINE (XG,Z-(Y0-1+EY*YMIN))-(XG,Z-(Y0+3+EY*YMAX))
1730 LOCATE LN2,(XG/8)-1 : PRINT INT(X((I+2)*NA));
1732 NEXT I
1734 LOCATE LN2,(XG/8)+4 : PRINT UNX$;
1736
1740 FOR Y=YMIN TO YMAX STEP YSUB 'Divisoes eixo YY' ysub
1750 IF Y<YMIN OR Y>YMAX THEN GOTO 1760
1754 YG= Z-(Y0+EY*Y) : LINE (XG-5,YG)-(XG,YG)
1756 LOCATE (YG/8)+1,(XG/8)-5 : PRINT USING "####";INT(Y);
1758 NEXT Y
1760 LOCATE (Z-Y0-EY*YMAX)/8,(XG/8)-7 :PRINT UNY$;
1762 LOCATE (Z-Y0-EY*YMAX)/8+1,(XG/8)-5 :PRINT USING "####";INT(YMAX)
1764 LOCATE LN2-1,(XG/8)-5 : PRINT USING "####";INT(YMIN)
1766
1770 XG= XG+XGSPN
1780 FOR I=1 TO 10 : Y= YSPAN/10*I+YMIN 'Divisoes eixo YY' (Y)
1784 YG= Z-(Y0+EY*Y) : LINE (XG,YG)-(XG+3-3*(I MOD 5=0),YG)
1786 NEXT I
1788 LOCATE (Z-Y0-EY*YMAX)/8,(XG+XGSPN)/8+3 : PRINT "100%";
1790 RETURN
1900
1910 --- PLOTA CALIBRACAO EM 2 CICLOS
1912 IA=0 : FOR K=1 TO 4 'Traca retas ideais entre ptos finais
1914 IS= (-1)*IA : XA= -(IA>0)*2*XSPAN1-(IA>2)*2*XSPAN2+IS*X(I*NA)
1916 IS= (-1)*K : XB= -(K>0)*2*XSPAN1-(K>2)*2*XSPAN2+IS*X(K*NA)
1920 DOY= EY*(Y(K*NA)-Y(IA*NA))/20 : DOX= EX*(XB-XA)/20
1924 XGA= XG+EX*XA : YGB= Z-(Y0+EY*(IA*NA))
1930 FOR I=1 TO 20 : PSET (I*DOX+XGA,YGB-I*DOY) : NEXT I : IA= K
1940 NEXT K
1950
1960 GOSUB 3000 'Plota poligonal das amostras
1970 RETURN
2000
2010 --- CONVERSÃO DE VALOR V PARA STRING EM VS COM 9 POSICOES ---
2012 IS= SIGN(V) : V= ABS(V) 'Extrai o sinal de V
2014 IF V=0 THEN VS="0.00" : RETURN
2016 VLG= LOG(V)/LOG(1000)
2018 IX= INT(VLG) : VM= 1000*(VLG-IX) 'Caracteristica, mantissa
2020 ISX= SIGN(IX) : IX= ABS(IX) 'Extrai o sinal do expoente
2022 IX= RIGHT$(STR$(100+IX*3),2) 'Expoente
2024 IM= INT(LOG(VM)/LOG(10)) : IR= 2-IM
2026 VM= STR$(FIX(VM*10**IR+.5)/10**IR+.0001) 'Expressao da mantissa
2028 VS= MID$(VS,2,4) 'Ajuste de tamanho
2030 VS= MID$(VS,1,3)+IS+2,1)+VM$
2032 IF IX<>0 THEN VS= VS+"E"+MID$(VS,1,3)+ISX+2,1)+IX$
2034 RETURN
2040
2050 --- PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS
2052 DH= 0 : DR= 0 'Linearidade,Histerese,Repetibilidade)
2054 FOR I=0 TO NI : IX= I MOD NA 'Percursos (IX: indice do mensurando)
2056 IC= I\NA : IS= (-1)*IC 'IC: No do ciclo, IS: variacao do mens.
2058 X= -(IC>0)*2*XSPAN1-(IC>2)*2*XSPAN2 + IS*X(I) 'X: abscissa total
2060
2070 IF I=IDL THEN XL= X 'Erro de LINEARIDADE ja' calc. em 3700
2080
2090 IF IC=1 OR IC>2 THEN GOTO 2380 'C apenas nas varreduras ascendentes)
2100
2110 DYH= ABS(Y(I)-Y((IC+2)*NA-IX)) 'Erro de HISTERESE
2120 IF DYH<DH THEN GOTO 2380
2130 DH= DYH : IDH= I : IDH1= (IC+2)*NA-IX : XH= X 'Pior ponto
2140 IXH= IDH1 MOD NA : ICH= IDH1\NA : ISH= (-1)*ICH
2150 IKH= ((ICH+1)/2)*200 : XH1= IKH+ISH*X(IDH1)
2160
2170 IF IC>1 THEN GOTO 2450 'C apenas no primeiro ciclo)
2180
2190 DYR= ABS(Y(I)-Y(2*NA+I)) 'Erro de REPETIBILIDADE
2200 IF DYR>DR THEN DYR= DYR : IDR= I : IDR1= 2*NA+I : XR= X 'Pior ponto
2210 IXR= IDR1 MOD NA : ICR= IDR1\NA : ISR= (-1)*ICR
2220 IKR= ((ICR+1)/2)*200 : XR1= IKR+ISR*X(IDR1)
2230
2240 NEXT I
2250 RETURN
2300
2310 --- PLOTAGEM DAS COORDENADAS NOTAVEIS AOS CRITERIOS
2320 YT= Y(IDL) : YG1= YT : IF YDL>YT THEN YT= YDL ELSE YG1= YDL 'LINEARIDADE
2330 XG= XL*EX+X0 : DXG= (XGSPN-EX*XL)/20 : DY= (YT-YMIN)/20
2340 FOR I=1 TO 20 : PSET (XG,Z-(Y0+EY*(YMIN+DY*I))) : NEXT I
2350 FOR I=1 TO 20 : X= I*DXG+XG
2360 PSET (X,Z-(Y0+EY*YT)) : PSET (X,Z-(Y0+EY*YG1))
2370 NEXT I
2380
2390 DY1= (Y(IDH)-YMIN)/10 : DY2= (Y(IDH1)-YMIN)/10 'HISTERESE
2400 IF Y(IDH)<Y(IDH1) THEN YG= Y(IDH)*EY+Y0 ELSE YG= Y(IDH1)*EY+Y0
2410 XG2= FNXT(IDH1,XSPAN1,XSPAN2,X(IDH1))*EX+X0
2420 XG1= FNXT(IDH,XSPAN1,XSPAN2,X(IDH))*EX+X0 : DX=(XG2-XG1)/10
2430 FOR I=1 TO 10
2440 PSET (XG1,Z-(Y0+EY*(YMIN+DY1*I))) : PSET (XG2,Z-(Y0+EY*(YMIN+DY2*I)))
2450 PSET (XG1+DX*I,Z-Y0)
2460 NEXT I
2470
2480 DY1= (Y(IDR)-YMIN)/10 : DY2= (Y(IDR1)-YMIN)/10 'REPETIBILIDADE
2490 IF Y(IDR)<Y(IDR1) THEN YG= Y(IDR)*EY+Y0 ELSE YG= Y(IDR1)*EY+Y0
2500 XG2= FNXT(IDR1,XSPAN1,XSPAN2,X(IDR1))*EX+X0
2510 XG1= FNXT(IDR,XSPAN1,XSPAN2,X(IDR))*EX+X0 : DX=(XG2-XG1)/10
2520 FOR I=1 TO 10
2530 PSET (XG1,Z-(Y0+EY*(YMIN+DY1*I))) : PSET (XG2,Z-(Y0+EY*(YMIN+DY2*I)))
2540 PSET (XG1+DX*I,Z-Y0)
2550 NEXT I
2560 RETURN
2570
2580 --- DADO X [0-100], CALCULA Y(X) ---> Y
2590
2600 AR= (I\NA)*2*FR
2610 Y2= (AR+P2)/200*(X^2 - 100*X) 'Alteracao de repetibilidade
2620 Y3= (AR+P3)/4688*(X^3 - 150*X^2 + 5000*X) 'Deformacao de 20.Grau
2630 Y= (100-V0)/100*X+V0 + Y2 + Y3 'Deform. de 30.Grau
2640 RETURN 'Valor conjugado de Y
2650
2660 --- PLOTA POLIGONAL [X;Y] ATE NI (em segmentos de reta.)
2670
2680 FOR I=0 TO NI-1 : J= I+1 'Percorre amostras
2690 XA= FNXT(I,XSPAN1,XSPAN2,X(I)) : XB= FNXT(J,XSPAN1,XSPAN2,X(J))
2700 IC= I\NA : IS= (-1)*IC : XA= -(IC>0)*2*XSPAN1-(IC>2)*2*XSPAN2 + IS*X(I)
2710 JC= J\NA : JS= (-1)*JC : XB= -(JC>0)*2*XSPAN1-(JC>2)*2*XSPAN2 + JS*X(J)
2720 XGB= EX*XB+X0 : YGB= Z-(Y0+EY*(J))
2730 LINE (EX*XA+X0,Z-(Y0+EY*(I)))-(XGB,YGB) 'Poligonal
2740
2750
2760
2770
2780
2790
2800
2810
2820
2830
2840
2850
2860
2870
2880
2890
2900
2910
2920
2930
2940
2950
2960
2970
2980
2990
3000

```

File : CALSTAT.BAS

Sheet : 3

```

0030 FOR K=-1 TO 1
0034 LINE (XGB-1,YGB+K)-(XGB+1,YGB+K) 'Marca ponto +mostra
0036 NEXT K
0038
0040 YGI=Z-(YO+EY*YMIN+ED*DIF(I)) : YGF=Z-(YO+EY*YMIN+ED*DIF(J)) 'diferencas
0042 XGI=XO+EX*XA : XGF=XGB : YDG=(YGF-YGI)/5 : DXG=(XGF-XGI)/5
0044 FOR K=0 TO 5 : PSET (XGI+K*DXG,YGI+K*YDG) : NEXT K
0046
0070 LOCATE ((Z-YGO-YGSPN\5)\5),((XGO+XGSPN\5)+3) : PRINT "difi:"
0072 LOCATE ((Z-YGO-YGSPN\5)\5)+1,((XGO+XGSPN\5)+2) : PRINT USING "##.##";DL
0074
0090 NEXT I
0100 RETURN
0110
0120 '--- CALCULO DE X --> F(Y) EM UMA VARREDURA DADA
0122 J - indice anterior do trecho (J,J+1) que contem (X,Y)
0124 K - indice de partida p/pesquisa (K --> K+NA)
0126 Y - valor da ordenada dada
0128
0130 FOR J=K TO K+NA-1 : IF (Y-Y(J))*(Y(J+1)-Y)>0 THEN GOTO 3280 ELSE NEXT J
0132 X=0 : GOTO 3290
0134 X=(Y-Y(J))/(Y(J+1)-Y(J))*(X(J+1)-X(J))+X(J)
0136 RETURN
0138
0140 '--- DEFINE CONFORMACAO DA CURVA SIMULADA
0142
0144 SCREEN 0,1 : COLOR 2,0,4 : CLS
0146 CLS : PRINT "CALSTAT-SIMULACAO DE CURVA DE CALIBRACAO DE TRANSDUTOR **"
0148 PRINT
0150 INPUT "a) Deform. de 2a.Ordem [0-2.0] F2= " : X$
0152 IF X$="" THEN SYSTEM ELSE F2=VAL(X$)
0154 IF F2>2 THEN INPUT "-----ERRO-----" : X$ : GOTO 3320
0156 INPUT "b) Deform. de 3a.Ordem [0-1.0] F3= " : X$
0158 IF X$="" THEN GOTO 3320 ELSE F3=VAL(X$)
0160 IF F3>1 THEN INPUT "-----ERRO-----" : X$ : GOTO 3330
0162 INPUT "c) Deslocamento de 0 [0-100] V0= " : X$
0164 IF X$="" THEN GOTO 3330 ELSE V0=VAL(X$)
0166 IF V0>100 THEN INPUT "-----ERRO-----" : X$ : GOTO 3340
0168 INPUT "d) Histerese cte F2 [0-0.05] H= " : X$
0170 IF X$="" THEN GOTO 3340 ELSE H=VAL(X$)
0172 IF H>.05 THEN INPUT "-----ERRO-----" : X$ : GOTO 3350
0174 INPUT "e) Nao-Repetibilidade [0-1.0] FR= " : X$
0176 IF X$="" THEN GOTO 3350 ELSE FR=VAL(X$)
0178 IF FR>1 THEN INPUT "-----ERRO-----" : X$ : GOTO 3360
0180 INPUT "f) Numero amostras/verr. [2-10] NA= " : X$
0182 IF X$="" THEN GOTO 3360 ELSE NA=VAL(X$)
0184 IF NA>10 THEN INPUT "-----ERRO-----" : X$ : GOTO 3370
0186 INPUT "g) Dispersao amostr.X [0-1.0] DA= " : X$
0188 IF X$="" THEN GOTO 3370 ELSE DA=VAL(X$)
0190 INPUT "h) Nome da unidade em X UNX$= " : UNX$
0192 IF UNX$="" THEN GOTO 3380
0194 INPUT "i) Nome da unidade em Y UNY$= " : UNY$
0196 IF UNY$="" THEN GOTO 3390
0198 INPUT "j) Faixa X [xmin:xmax] X1,XN= " : X$ : IF X$="" THEN 3392
0199 I=INSTR(1,X$,":") : X1=VAL(LEFT$(X$,I-1)) : XN=VAL(MID$(X$,I+1,LEN(X$)-I))
0200 INPUT "k) Faixa Y [ymin:ymax] Y1,YN= " : X$ : IF X$="" THEN 3394
0201 I=INSTR(1,X$,":") : Y1=VAL(LEFT$(X$,I-1)) : YN=VAL(MID$(X$,I+1,LEN(X$)-I))
0202
0204 RETURN
0206
0208 '--- PRODUZ DADOS DE 2 CICLOS DE CALIBRACAO SIMULADOS
0210
0212 I=0 : X(I)=X1 : GOSUB 2900 : Y(I)=Y : X(I)=X
0214 'Ponto inicial (0,y)
0216 I=0 : X= X1 : GOSUB 2900 : Y(I)=Y : X(I)=X
0218 'Ponto inicial (0,y)
0220 FOR I=1 TO 4*NA
0222 IF I=2*NA OR I=4*NA THEN X=0 : GOTO 3350
0224 IC=I\NA : IX=I MOD NA : IF (IC MOD 2)=0 THEN X=IX ELSE X=NA-IX
0226 X=100/NA*(X+(1-RND(5))*DA) 'Produz abcissa linear + dispersao
0228 GOSUB 2900 : Y(I)=(Y+H*Y2*(I-1))/(1+H*Y2) 'C/histerese cte F2
0230 X(I)=X : NI=I
0232 'Conta pto gerados
0234
0236 GOSUB 1200 : XSPAN=ABS(XN-X1) : YSPAN=ABS(YN-Y1)
0238 FOR I=0 TO NI
0240 X(I)=X(I)/XMAX*XSPAN+X1 : Y(I)=Y(I)/YMAX*YSPAN+Y1 'Ajuste a faixa dada
0242 NEXT I
0244 RETURN
0246
0248 '--- PROCESSA CARACTERES ESPECIAIS ("c") EM X$ ---
0250
0252 I=INSTR(1,X$,"c") : IF I=0 THEN RETURN 'Verifica existencia
0254 IF I=2 THEN P$="" ELSE P$=LEFT$(X$,I-1)
0256 X$=P$+CHR$(ASC(MID$(X$,I+1,1))+128)+RIGHT$(X$,LEN(X$)-I-1)
0258 RETURN
0260
0262 '--- PROCESSA CURVA DE DIFERENCA COM RETA IDEAL ---
0264
0266 DL=0
0268 FOR K=0 TO 3
0270 Y00=Y(K*NA) : X00=X(K*NA) 'Processa os ciclos
0272 DYDX=(Y((K+1)*NA)-Y00)/(X((K+1)*NA)-X00) 'Coeficientes reta ideal
0274 FOR I=0 TO NA : YL=((X(K*NA+I)-X00)*DYDX+Y00)
0276 DIF(K*NA+I)=ABS(Y(K*NA+I)-YL) 'Calculo Dif.
0278 IF DIF(K*NA+I)>DL THEN DL=DIF(K*NA+I) : IDL=K*NA+I : YDL=YL
0280 NEXT I
0282 NEXT K
0284 ED=YSPAN/DL*2/10*EY 'Escala p/curva Dif em 2/10
0286 RETURN
0288
0290

```



File : CALDINA.BAS

Sheet : 1

```

-----*
1  CALDINA - SCH - MAI/95 - REGISTRO DE CALIBRACAO DINAMICA SIMULADO
2  GOTO 10
3  PRINT "** CALDINA **" : SAVE "CALDINA",A
4
5
6  SCREEN 0,0 : COLOR 2,0,4 : END
7
8  --- INICIALIZACAO
9
10 Z= 200 : XG0= 100 : XGSPN= 450 : YG0= 64 : YGSPN= 90      'Param.graficos
11 UNX= "H:"
12 PI= 3.141592654
13 DF= 1
14 DIM X(40),Y(40),XLG(40),YDB(40)
15 RANDOMIZE (VAL(RIGHT$(TIME$,2)))
16 DEF FNHR(R,RO,RB)= RO^2 / SQR((RB+(R-RO)^2)*(RB+(R+RO)^2))
17 ON ERROR GOTO 4000
18
19 --- PROCEDIMENTO INICIAL ---
20
21 GOSUB 3300 : GOSUB 3500      'Ajusta parametros p/simul. e gera dados
22 X= UNX : GOSUB 3600 : UNX= X      'Traduz unidades especiais
23 Y= UNY : GOSUB 3600 : UNY= Y      '(Com prefixo " p/ASCII extendido)
24 FOR I=0 TO NI-1
25 LOCATE ((I-1) MOD NA)+13,((I-1)\NA)*20+1
26 PRINT USING "HH HHHH.H HHHH.H";I,X(I),Y(I)
27 NEXT I
28 INPUT "":X
29 GOSUB 2200      'Processa pontos caracteristicos (patamar YM)
30 GOSUB 1400      'Converte p/valores logaritmicos em YDB
31 GOSUB 2300      'Processa ressonancia
32 GOSUB 1200 : GOSUB 1300      'Determina dominio do grafico
33 SCREEN 2,1 : CLS      'Tela Grafica
34 GOSUB 1100 : GOSUB 1600      'Processa escalas e trace eixos (quadro)
35 GOSUB 2000      'Plota amostras
36 GOSUB 2900      'Plota curva de interpretacao
37
38 --- TABELA DE INDICES CARACTERISTICOS ---
39
40 LOCATE 21,1
41 PRINT TAB(15);"Interpretacao:"
42 PRINT TAB(30); : PRINT USING "Ampl.Patamar ( 0 dB) : HHHH.H %";YM,UNY
43 IF FC=0 THEN GOTO 260
44 PRINT TAB(30); : PRINT USING "Freq.Canto (-3 dB) : HHHH.H Hz";FC
45 IF FR=0 THEN GOTO 290
46 PRINT TAB(30); : PRINT USING "Freq.Ressonancia : HHHH.H Hz";FR
47 PRINT TAB(30); : PRINT USING "Fator de Merito (Q) : HHHH.H ";Q
48 LINE (1,1)-(640,200),,B      'moldura
49
50 --- IMPRESSAO DO ARQUIVO ---
51
52 X= INKEY$ : IF X=" " THEN GOTO 310      'aguarda tecla
53 IF X<>" " THEN GOTO 100      'novo teste
54 BEEP
55 CLS : "CAL_F31.EPS" : G.RE= 10
56 CHAIN "RECSCR",30,ALL      'grava tela
57
58 END
59 STOP
60
61 --- DETERMINA SUBDIVISOES QSUB,FAIXA QSPAN,QQMIN,QQMAX P/SIST.(QMAX,QMIN)
62
63 QSPAN= QMAX-QMIN
64 NDIV= 2^((SQN(QMAX)-SQN(QMIN))+1)
65 QDIV= QSPAN/NDIV
66 NORD= INT((LOG(QDIV)/LOG(10)))
67 QDVN= QDIV/10^NORD
68
69 IF QDVN>4 THEN QSUB= 5 : GOTO 1070
70 IF QDVN>2 THEN QSUB= 2 : GOTO 1070
71 QSUB= 1
72 QSUB= QSUB*10^NORD
73 QQMIN= INT(QMIN/QSUB)*QSUB
74 ND= INT(QMAX/QSUB)
75 IF ND*QSUB=QMAX THEN QQMAX= QSUB*ND ELSE QQMAX= QSUB*(ND+1)
76 RETURN
77
78 --- DETERMINA ESCALAS (pixel/mensuron) E BASE ACORDE C/LINHAS TEXTO ---
79
80 NDY= (YQMAX-YQMIN)\YSUB : YGS= INT(YGSPN/NDY/8+.5)*8
81 EY= YGS/YSUB
82 EX= XGSPN/XSPAN
83 XGO= INT(XG0/8)*8 : YGO= INT(YG0/8)*8
84 XO= INT(XGO-EX*QMIN) : YO= INT(YGO-EY*YMIN)+4
85 RETURN
86
87 --- PROCESSA FAIXA DE ABRANGENCIA DA AMOSTRAGEM ---
88
89 XMAX= XLG(0) : XMIN= XLG(0) : YMAX= YDB(0) : YMIN= YDB(0)
90 FOR I=1 TO NI-1
91 IF XLG(I)>XMAX THEN XMAX= XLG(I)
92 IF XLG(I)<XMIN THEN XMIN= XLG(I)
93 IF YDB(I)>YMAX THEN YMAX= YDB(I)
94 IF YDB(I)<YMIN THEN YMIN= YDB(I)
95 NEXT I
96 RETURN
97
98 --- PROCESSA SUBDIVISOES DA AREA A GRAFICAR (USA XGSPN,YGSPN) ---
99
100 QMIN= XMIN : QMAX= XMAX : GOSUB 1000 : XSUB= QSUB : XSPAN= QSPAN
101 QMIN= YMIN : QMAX= YMAX : GOSUB 1000
102 YMIN= QMIN : YMAX= QMAX : YSUB= QSUB : YSPAN= QSPAN
103 RETURN
104
105 --- CONVERTE A UNIDADES LOG-LOG (DECIBEIS, LOG2) ---
106
107 FOR I=0 TO NI-1
108 XLG(I)= I
109 YDB(I)= 10 * LOG(Y(I))/LOG(10)
110 NEXT I
111 RETURN
112
113 --- TRACADO DE EIXOS ---
114
115 YG= Z-(YO+EY*YMIN) : IF YMIN>0 THEN GOTO 1614      'Eixo XX' inf.
116 LINE (XO-5,YG)-(XO+XGSPN+5,YG) : GOTO 1620
117 FOR XO=XO-5 TO XO+XGSPN STEP 10 : LINE (XO,YG)-(XO+4,YG) : NEXT XO
118 NDX= XSPAN \ XSUB
119 FOR I=1 TO NDX : XA= EX*(XMIN+I) *XSUB
120 XG= XO+XA : LINE (XG,YG+3)-(XG,YG)
121 NEXT I
122 FOR X=XO TO XO+XGSPN STEP XGSPN/100 : PSET (X,Z-YO) : NEXT X
123 YG= Z-(YO+EY*YMAX) : LINE (XO-5,YG)-(XO+XGSPN+5,YG)      'Eixo XX' sup
124
125 LN2= ((Z-YGO)\8)+1
126 FOR I=0 TO 1 : XG= XO+I*EX*XSPAN
127 LINE (XG,Z-(YO-1+EY*YMIN))-(XG,Z-(YO+3+EY*YMAX))
128 NEXT I
129 FOR I=0 TO NDX : XG= XO+EX*(XMIN+I) : LOCATE LN2+1,(XG\8)-1
130 IF X(I)>10 THEN PRINT USING "HHH";X(I) : ELSE PRINT USING "HHH.H";X(I)
131 NEXT I
132 LOCATE LN2,(XG\8)+4 : PRINT UNX$
133
-----*

```



File : CALDINA.BAS

Sheet : 2

```

1740 FOR Y=YMIN TO YMAX STEP YSUB 'Divisões eixo YY' ysub
1750 IF Y<YMIN OR Y>YMAX THEN GOTO 1760
1760 YB=Z-(Y0+EY*Y) : LINE (X0-5,YB)-(X0,YB)
1770 LOCATE (YB\8)+1,(X0\8)-5
1780 IF ABS(YSUB)>=1 THEN PRINT USING "####";Y; ELSE PRINT USING "###.###";Y;
1790 NEXT Y
1800 LOCATE (Z-Y0-EY*YMAX)\8+1,(X0\8)-8 : PRINT USING "####.###";YMAX
1810 LOCATE LN2-1,(X0\8)-8 : PRINT USING "####.###";YMIN
1820 LOCATE (Z-Y0-EY*YMAX)\8+1,(X0\8)-9 : PRINT "dB";
1830 RETURN
1840 --- PLOTA CALIBRACAO EM PONTOS AMOSTRADOS ---
1850 FOR I=0 TO NI-1 : J= I+1
1860 XG= EXX*LG(I)+X0 : YG= Z- (EY*YDB(I)+Y0)
1870 GOSUB 2100 'Percorre amostras
1880 NEXT I 'Ponto amostrado
1890 RETURN 'Plota diamante
1900 --- PLOTA DIAMANTE NO PONTO (X0,Y0) ---
1910 LINE (X0,Y0+2)-(X0+4,Y0)
1920 LINE (X0+4,Y0)-(X0,Y0-2)
1930 LINE (X0,Y0-2)-(X0-4,Y0)
1940 LINE (X0-4,Y0)-(X0,Y0+2)
1950 RETURN
1960 --- PROCESSA PATAMAR E FREQUENCIAS CARACTERISTICAS ---
1970 YDMIN= 1000000
1980 FOR I1=0 TO NI-3 'Todas combinacoes 3 pto
1990 FOR I2=I1+1 TO NI-2
2000 FOR I3=I2+1 TO NI-1
2010 LOCATE 22,1 : PRINT I1;I2;I3;
2020 YM= (Y(I1) + Y(I2) + Y(I3))/3
2030 YDSV= (Y(I1)-YM)^2 + (Y(I2)-YM)^2 + (Y(I3)-YM)^2
2040 IF YDSV >= YDMIN THEN GOTO 2280 'Media de 3 pto
2050 YDMIN= YDSV : YMED= YM : IP(I)= I1 'Desvio quad.
2060 'nao interessa
2070 'melhor conjunto
2080 NEXT I3 : NEXT I2 : NEXT I1
2090 IF SQR(YDMIN/3)/YMED>.1 THEN YM= YMED : GOTO 2370 'patamar precario
2100 --- CALCULA PATAMAR DE GANHO E NORMALIZA AMOSTRAS AO PATAMAR ---
2110 NIP= 0 : YM= 0
2120 FOR I=0 TO NI
2130 IF ABS(Y(I)-YMED)/YMED<.1 THEN NIP= NIP+1 : IP(NIP)=I : YM= YM+Y(I)
2140 NEXT I
2150 YM= YM/NIP 'Intensidade media -> patamar de nivel 0 dB
2160 FOR I=0 TO NI : Y(I)= Y(I)/YM : NEXT I 'Normaliza por YM
2170 --- PROCESSA RAMPA DE SUBIDA DE NIVEL EM BAIXA FREQUENCIA ---
2180 NIS= 0 : FC= 0 : IF IP(1)<1 THEN GOTO 2300 'patamar desde 1
2190 IF Y(0)/YM>.9 THEN GOTO 2300 'Corte baixa freq. nao caracterizado
2200 FOR I=1 TO IP(1)
2210 IF Y(I)<=Y(I-1) OR Y(I)>Y(I+1) THEN NIS= 0 : GOTO 2300 'furo
2220 NIS= NIS+1
2230 NEXT I
2240 FOR I=0 TO NIS-1
2250 FC= FC + X(I)*(1/Y(I)-1) 'Acumula freq.p/cada amostra
2260 NEXT I
2270 FC= FC/NIS 'Freq.de corte media
2280 --- PROCESSA FREQUENCIA DE RESSONANCIA SE EXISTENTE
2290 FR= 0
2300 IF YDB(NI-1)>YDB(NI-2) THEN GOTO 2385 'nao ha' config. tipica
2310 FOR J=NI-1 TO 0 STEP -1
2320 IF YDB(J-1)<YDB(J) THEN GOTO 2340 'YDB(J) e' maximo local
2330 NEXT J
2340 GOTO 2385 'nao ha' config. tipica
2350 FLS= XLG(J+1) + YDB(J+1)/12
2360 FLI= XLG(J) - YDB(J)/12
2370 FLR= (FLI+FLS)/2
2380 FR= FL * 2^FLR
2390 YPIC= (FLS-FLI)*4 : Q= LOG(YPIC)^2/.8
2400 RETURN 'em Hz
2410 'estima Q
2420 --- PLOTA CURVA DE INTERPRETACAO DA AMOSTRAGEM ---
2430 W0= 2*PI*FR : IF Q>0 THEN B= W0^2/(4*Q^2)
2440 IF FR>0 THEN A= 1/FNHR(2*PI,W0,B) 'compensacao ampl.patamar
2450 FOR I=0 TO NO STEP .1
2460 F= FL * 2^(I) : W= 2*PI*F
2470 H1= F/(F+FC)
2480 IF FR=0 THEN H2=1 : GOTO 2950
2490 H2= A * FNHR(W,W0,B)
2500 HDB= 10 * LOG(H1*H2)/LOG(10)
2510 PSET (EXX*I+X0,Z-(EY*HDB+Y0))
2520 NEXT I
2530 IF FC>0 THEN XGC= LOG(FC/FL)/LOG(2)*EXX*SPAN/9+X0
2540 IF FR>0 THEN XGR= LOG(FR/FL)/LOG(2)*EXX*SPAN/9+X0
2550 FOR Y=YMIN TO YMAX STEP (YMAX-YMIN)/20
2560 YG= Z-(Y0+EY*Y)
2570 IF FC>0 AND FC<FL THEN PSET (XGC,YG) 'freq.de corte baixas
2580 IF FR>0 THEN PSET (XGR,YG) 'freq.central de resson.
2590 NEXT Y
2600 RETURN
2610 --- DEFINE CONFORMACAO DA CURVA SIMULADA
2620 SCREEN 0,1 : COLOR 2,0,4 : CLS
2630 GOSUB 3310 PRINT "CALDINA- SIMULACAO DE CURVA DINAMICA DE TRANSDUTOR ***"
2640 INPUT "a) Freq.Corte Baixo [1-100] FC= " : X$ = "
2650 IF X$="" THEN SYSTEM ELSE FC=VAL(X$)
2660 IF FC>100 THEN INPUT "-----ERRO-----" : X$ = " : GOTO 3320
2670 INPUT "b) Freq.Resson.Midia [200-2000] FO= " : X$ = "
2680 IF X$="" THEN GOTO 3320 ELSE FO=VAL(X$)
2690 IF FO<200 THEN INPUT "-----ERRO-----" : X$ = " : GOTO 3330
2700 INPUT "c) Fator de Merito [1-20] Q= " : X$ = "
2710 IF X$="" THEN GOTO 3330 ELSE Q=VAL(X$)
2720 IF Q>20 THEN INPUT "-----ERRO-----" : X$ = " : GOTO 3340
2730 INPUT "d) Ruído de medição [0-1.0] RU= " : X$ = "
2740 IF X$="" THEN GOTO 3340 ELSE RU=VAL(X$)
2750 IF RU>1 THEN INPUT "-----ERRO-----" : X$ = " : GOTO 3350
2760 INPUT "e) Nome da unidade em Y UNY= " : UNY$ = "
2770 IF UNY$="" THEN GOTO 3350
2780 INPUT "f) Faixa X [fmin:fmax] X1:XM= " : X$ = "
2790 IF X$="" THEN GOTO 3360
2800 I=INSTR(1,X$,":") : X1= VAL(LEFT$(X$,I-1)) : XM=VAL(MID$(X$,I+1,LEN(X$)-I))
2810 INPUT "g) Saida nominal em Y [1-100] YN= " : X$ = "
2820 IF X$="" THEN GOTO 3370
2830 YN=VAL(X$)
2840 RETURN
2850
2860
2870
2880
2890
2900
2910
2920
2930
2940
2950
2960
2970
2980
2990
3000
3010
3020
3030
3040
3050
3060
3070
3080
3090
3100
3110
3120
3130
3140
3150
3160
3170
3180
3190
3200
3210
3220
3230
3240
3250
3260
3270
3280
3290
3300
3310
3320
3330
3340
3350
3360
3370
3380
3390
3400
3410
3420
3430
3440
3450
3460
3470
3480
3490
3500
3510
3520
3530
3540
3550
3560
3570
3580
3590
3600
3610
3620
3630
3640
3650
3660
3670
3680
3690
3700
3710
3720
3730
3740
3750
3760
3770
3780
3790
3800
3810
3820
3830
3840
3850
3860
3870
3880
3890
3900
3910
3920
3930
3940
3950
3960
3970
3980
3990
4000
4010
4020
4030
4040
4050
4060
4070
4080
4090
4100
4110
4120
4130
4140
4150
4160
4170
4180
4190
4200
4210
4220
4230
4240
4250
4260
4270
4280
4290
4300
4310
4320
4330
4340
4350
4360
4370
4380
4390
4400
4410
4420
4430
4440
4450
4460
4470
4480
4490
4500
4510
4520
4530
4540
4550
4560
4570
4580
4590
4600
4610
4620
4630
4640
4650
4660
4670
4680
4690
4700
4710
4720
4730
4740
4750
4760
4770
4780
4790
4800
4810
4820
4830
4840
4850
4860
4870
4880
4890
4900
4910
4920
4930
4940
4950
4960
4970
4980
4990
5000
5010
5020
5030
5040
5050
5060
5070
5080
5090
5100
5110
5120
5130
5140
5150
5160
5170
5180
5190
5200
5210
5220
5230
5240
5250
5260
5270
5280
5290
5300
5310
5320
5330
5340
5350
5360
5370
5380
5390
5400
5410
5420
5430
5440
5450
5460
5470
5480
5490
5500
5510
5520
5530
5540
5550
5560
5570
5580
5590
5600
5610
5620
5630
5640
5650
5660
5670
5680
5690
5700
5710
5720
5730
5740
5750
5760
5770
5780
5790
5800
5810
5820
5830
5840
5850
5860
5870
5880
5890
5900
5910
5920
5930
5940
5950
5960
5970
5980
5990
6000
6010
6020
6030
6040
6050
6060
6070
6080
6090
6100
6110
6120
6130
6140
6150
6160
6170
6180
6190
6200
6210
6220
6230
6240
6250
6260
6270
6280
6290
6300
6310
6320
6330
6340
6350
6360
6370
6380
6390
6400
6410
6420
6430
6440
6450
6460
6470
6480
6490
6500
6510
6520
6530
6540
6550
6560
6570
6580
6590
6600
6610
6620
6630
6640
6650
6660
6670
6680
6690
6700
6710
6720
6730
6740
6750
6760
6770
6780
6790
6800
6810
6820
6830
6840
6850
6860
6870
6880
6890
6900
6910
6920
6930
6940
6950
6960
6970
6980
6990
7000
7010
7020
7030
7040
7050
7060
7070
7080
7090
7100
7110
7120
7130
7140
7150
7160
7170
7180
7190
7200
7210
7220
7230
7240
7250
7260
7270
7280
7290
7300
7310
7320
7330
7340
7350
7360
7370
7380
7390
7400
7410
7420
7430
7440
7450
7460
7470
7480
7490
7500
7510
7520
7530
7540
7550
7560
7570
7580
7590
7600
7610
7620
7630
7640
7650
7660
7670
7680
7690
7700
7710
7720
7730
7740
7750
7760
7770
7780
7790
7800
7810
7820
7830
7840
7850
7860
7870
7880
7890
7900
7910
7920
7930
7940
7950
7960
7970
7980
7990
8000
8010
8020
8030
8040
8050
8060
8070
8080
8090
8100
8110
8120
8130
8140
8150
8160
8170
8180
8190
8200
8210
8220
8230
8240
8250
8260
8270
8280
8290
8300
8310
8320
8330
8340
8350
8360
8370
8380
8390
8400
8410
8420
8430
8440
8450
8460
8470
8480
8490
8500
8510
8520
8530
8540
8550
8560
8570
8580
8590
8600
8610
8620
8630
8640
8650
8660
8670
8680
8690
8700
8710
8720
8730
8740
8750
8760
8770
8780
8790
8800
8810
8820
8830
8840
8850
8860
8870
8880
8890
8900
8910
8920
8930
8940
8950
8960
8970
8980
8990
9000
9010
9020
9030
9040
9050
9060
9070
9080
9090
9100
9110
9120
9130
9140
9150
9160
9170
9180
9190
9200
9210
9220
9230
9240
9250
9260
9270
9280
9290
9300
9310
9320
9330
9340
9350
9360
9370
9380
9390
9400
9410
9420
9430
9440
9450
9460
9470
9480
9490
9500
9510
9520
9530
9540
9550
9560
9570
9580
9590
9600
9610
9620
9630
9640
9650
9660
9670
9680
9690
9700
9710
9720
9730
9740
9750
9760
9770
9780
9790
9800
9810
9820
9830
9840
9850
9860
9870
9880
9890
9900
9910
9920
9930
9940
9950
9960
9970
9980
9990
10000

```

File : CALDINA.BAS

Sheet : 3

```

3000 :--- PRODUZ DADOS DE CICLO DE CALIBRACAO SIMULADO
3003 :
3006 NO= INT(LOG(XN/X1)/LOG(2)+.5) 'M de oitavas
3007 WO= 2*PI*FO : FL= X1 : NA= 0
3008 WO= 2*PI*FO : B= WO^2/(4*Q^2) : A= 1
3009 :
3010 FOR I=0 TO NO STEP DF
3020 F= FL * 2^(I) : W= 2*PI*F 'Varredura log da frequencia
3030 IF FO=0 THEN H1= 1 : GOTO 3550 'Respostas elementares
3040 H1= W/(W+WC) 'elemento passa-altas
3050 :
3060 IF FO=0 THEN H2= 1 : GOTO 3570 'elemento ressonante
3070 H2= FNHR(W,W0,B)
3080 :
3090 X(NA)= F : Y(NA)= YN * H1*H2 * (1+RURND(1))
3100 NA= NA+1 'Pares de amostragem
3110 HDB= 20 * LOG(H1*H2)/LOG(10) 'Resposta em decibels
3120 NEXT I : NI= NA
3130 :
3140 RETURN
3150 :
3160 :--- PROCESSA CARACTERES ESPECIAIS (^c) EM X$ ---
3170 :
3180 I= INSTR(1,X$,"^") : IF I=0 THEN RETURN 'Verifica existencia
3190 IF I<2 THEN P$="" ELSE P$= LEFT$(X$,I-1)
3200 X$= P$ + CHR$(ASC(MID$(X$,I+1,1))+128) + RIGHT$(X$,LEN(X$)-I-1)
3210 RETURN
3220 :
3230 :--- RECEPCAO DE ERRO DE PROCESSAMENTO ---
3240 :
3250 LOCATE 24,1 : PRINT STRING$(78," ")
3260 LOCATE 24,1 : PRINT "C ERRO "ERR:" na linha"ERL:" ]"
3270 LOCATE 22,1 : END

```

File : EPSCAL.BAS

Sheet : 1

```

1  EPSCAL - SCH - JUN/94 - PLOTA CICLOS DE CALIBRACAO EM IMPR. EPSON
2  GOTO 10
3  PRINT "*** EPSCAL.BAS ***" : SAVE "EPSCAL",A
4
10  --- Chamado (CHAIN) por CALIB, com dados em X(NI),Y(NI)
11
12  ES= CHR$(27) : [Escape]
13  WIDTH "LPT1:",132
14  LPRINT ES;"A";CHR$(8) : Espacamento linha = 8/72"
15  DIM KN(640),XI(3,10),YI(3,10) : Codigos graficos da linha
16  IF NI<40 THEN INPUT "N AMOSTRAS <> 10",X$ : END
17
100 --- CALCULO DE PARAMETROS PARA O ENQUADRAMENTO DO GRAFICO
101
102 XMAX=-999 : YMAX=-999 : Valores maximos
103 FOR I=1 TO NI
104 IF X(I)>XMAX THEN XMAX=X(I)
105 IF Y(I)>YMAX THEN YMAX=Y(I)
106 NEXT I
107 DXN=160 : DY=INT(150/YMAX+.5)*YMAX : Dimensao em pixels
108 DYN=INT(DY/8+.5)*8
109 SX=DXN/XMAX : SY=DYN/YMAX : Fatores de escala
110 PRINT "XMAX=";XMAX;"YMAX=";YMAX : Mostra Faixa
111 PRINT "DX=";DX;"DY=";DY;"SX=";SX;"SY=";SY
112 --- Reordenar e Reescalar no padrao de impressao
113 FOR I=0 TO 10
114 XI(0,I)=SX*X(I) : YI(0,I)=SY*Y(I)
115 XI(1,I)=SX*X(20-I) : YI(1,I)=SY*Y(20-I)
116 XI(2,I)=SX*X(40-I) : YI(2,I)=SY*Y(40-I)
117 NEXT I
118
120 --- PERCURSO DAS LINHAS (SENTIDO Y INVERTIDO) ---
121
122 FOR IYN=DYN-7 TO 0 STEP -8
123 IYIN=IYN+7 : PRINT IYN :
124 FOR IX=0 TO 640 : KN(IX)=0 : NEXT IX : Inicializa bitmap
125
126 --- PERCORRE PONTOS E MARCA TRACOS DA POLIGONAL
127
128 FOR JN=0 TO 3
129 FOR IX=0 TO 9
130 U=YI(JN,IX) : V=YI(JN,IX+1) : D=XI(JN,IX+1)-XI(JN,IX) : Fora faixa
131 IF (U>IYIN AND V>IYIN) OR (U<IYIN AND V<IYIN) THEN 370 : Declive X
132 A=D/(V-U)
133 FOR YK=U TO V STEP (V-U)/SQRT((V-U)^2+D^2)
134 IF YK>IYIN OR YK<IYIN THEN GOTO 360 : Fora faixa
135 XN=A*(YK-U) + XI(JN,IX) : Abscissa exata absoluta
136 IXN=INT((2*XN+1)/3)*2*DXN/3 + (-1)^JN*XN : Coluna de pixels na plotagem
137 IPN=INT(YK-IYIN+.5) : Bit do byte a marcar
138 KN(IXN)=KN(IXN) OR (2^IPN) : Insere pixel
139 NEXT YK
140 NEXT IX
141 NEXT JN
142
143 --- EIXOS XX' E YY' -----
144
145 FOR I=0 TO 640 STEP 160 : KN(I)=85 : NEXT I : Eixos YY' continuo
146 IF IYIN<DYN THEN GOTO 430
147 FOR IX=1 TO 640 STEP 8 : KN(IX)=KN(IX) OR 128 : NEXT IX : Eixo XX' superior
148 IF IYIN>1 THEN GOTO 440
149 FOR IX=1 TO 640 STEP 8 : KN(IX)=KN(IX) OR 1 : NEXT IX : Eixo XX' inferior
150
151 --- IMPRIME LINHA
152
153 LPRINT " " :
154 LPRINT ES;"L";CHR$(641 MOD 256);CHR$(641\256) : Header linha grafica
155 FOR IX=0 TO 640 : LPRINT CHR$(KN(IX)); : NEXT IX
156 LPRINT
157
158 NEXT IYN
159
160 --- FINALIZACAO -----
161
162 WIDTH "LPT1:",80 : LPRINT ES;"@" : Reset da Impressora
163

```



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais

Equipamento de Ensaio para  
Acelerômetros Piezoelétricos

Dissertação apresentada aos Srs.

---

---

---

---

Visto e permitida a impressão

Porto Alegre, 17/03/92



Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Metalúrgica e dos Materiais